

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
Высшего профессионального образования
"Воронежская государственная лесотехническая академия"

На правах рукописи

Мохаммед Хайдер А.Аббас

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ
ДЕКОРАТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕБЕЛИ НА СТАНКАХ С ЧПУ**

Специальность 05.21.05 - Древесиноведение, технология
и оборудование деревопереработки

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Заслуженный деятель
науки и техники РФ,
доктор технических наук
профессор Петровский В.С.

Воронеж 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА О ФРЕЗЕРОВАНИИ ДЕКОРАТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕБЕЛИ	10
1.1 Технологии фрезерования деталей мебели с элементами декора на станках с ЧПУ	10
1.2 Проблема выбора технологических параметров при декоративном фрезеровании древесины	17
1.3 Управляющие программы для фрезерования декоративных элементов мебели	21
1.4 Анизотропия структуры древесины и необходимость ее учета при фрезеровании древесины	26
1.5 Цель и задачи исследования	37
1.6 Выводы	38
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ С УЧЕТОМ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ	39
2.1 Математическая модель процесса фрезерования древесины с заданной структурой годичных слоев	39
2.2 Исследование влияния макроструктуры древесины на качество поверхности пиломатериалов при фрезеровании	59
2.3 Исследование влияния технологических параметров процесса фрезерования на качество поверхности	64
2.4 Методика оптического распознавания структуры поверхности древесины	68
2.5 Технология адаптивного декоративного фрезерования	75
2.6 Выводы	80

3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	82
3.1 Экспериментальная фрезерная установка	82
3.2 Образцы древесины для экспериментальных исследований.....	89
3.3 Методика определения показателей качества обработанной поверхности	89
3.4 Стратегия и порядок проведения экспериментального исследования	93
3.5 Выводы	95
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ С УЧЕТОМ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ	96
4.1 Экспериментальный поиск оптимальных скоростей подачи фрезы вдоль и поперек волокон для древесины различных пород	96
4.2 Оптимальная скорость подачи фрезы при произвольном угле между траекторией движения и направлением волокон	109
4.3 Исследование целесообразности и эффективности адаптивного фрезерования	111
4.4 Оптимизация технологических параметров процесса фрезерования изотропного материала в зависимости от влажности поверхности	116
4.5 Выводы	123
5 ВНЕДРЕНИЕ ПРЕДЛАГАЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ПРОИЗВОДСТВО И ОЦЕНКА ИХ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ	125
5.1 Промышленная апробация и внедрение результатов работы	125
5.2 Техничко-экономическая эффективность процесса фрезерования с учетом макроструктуры поверхности	126
5.3 Выводы	131
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ	132
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	134

ПРИЛОЖЕНИЕ А	147
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	148
ПРИЛОЖЕНИЕ В	149
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	151
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	153
ПРИЛОЖЕНИЕ Е	155
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж	159

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Согласно маркетинговым исследованиям, в России и в арабских странах, в частности, в Ираке, широко востребована мебель с декоративными элементами со сложным и высокоэстетическим декором.

В настоящее время в крупносерийном производстве мебели декоративное фрезерование производят на предварительно сформированных заготовках из элементов со строго заданной ориентацией волокон. При этом режимы фрезерования вдоль и поперек волокон подбирают опытным и экспертным путем. В мелкосерийном и позаказном производстве в условиях малых предприятий фрезерование производится с постоянными технологическими параметрами (скорость подачи, частота вращения фрезы), однако из-за анизотропии структуры механические свойства, а следовательно и качество обработки поверхности, оказываются различными вдоль и поперек волокон.

При декоративном фрезеровании на станках с ЧПУ фреза движется в пространстве по сложной траектории с одновременным изменением от двух до пяти координат. При обработке участков древесины с малым радиусом кривизны из-за несоответствия технологических параметров локальной структуре поверхности, часто образуются сколы и другие дефекты, приводящие к браку или требующие дополнительных операций восстановления элементов мебели.

Особенно выражены дефекты фрезерования при обработке малоценной древесины, которая имеет низкие механические свойства и существенную неоднородность структуры, и поэтому более требовательна к режимам фрезерования. Также в последние годы пользуется спросом мебель из древесины с целевыми пороками (в частности, сучками), представляющими эстетическую ценность. Области древесины вблизи порока также чувствительны к режимам фрезерования.

В этой связи актуальной является задача разработки технологии адаптивного фрезерования древесины, учитывающей локальную структуру поверхности, и управляющей технологическими параметрами в зависимости от локальной макроструктуры в области обработки. Технологии адаптивного фрезерова-

ния, могут повысить производительность процесса, уменьшить шероховатость поверхности, уменьшить количество сколов и других повреждений. В первую очередь, такие технологии могут быть полезны для мелкосерийного и позаказного производства, где нет возможности подбирать режимы фрезерования опытным путем, а необходимо на первой же неориентированной заготовке получить качественную поверхность.

Исследования выполнены в рамках государственной бюджетной темы "Компьютеризация технологий и экономических систем управления в лесном комплексе", № 01.2.01168728.

Степень разработанности проблемы. Существующие технологии фрезерования древесины и системы управления станками с ЧПУ разработаны Босинзоном М.А., Гордиенко В.В., Мовниным М.С., Петровским В.С., Ефимовой Т.В., Разиньковым Е.М., Хуажевым О.З. и др. Процессы механической обработки древесины изучались Любченко В.И., Сергеевичевым А.В., Фоминым А.А. и др. Влияние анизотропии структуры древесины на ее механические свойства изучалось в работах Перельгина Л.М., Тамби А.А., Торопова А.С., Уголева Б.Н., Чубинского А. Н. Вопросам формирования высококачественной древесины посвящены работы Косиченко Н.Е., Киселевой А.В., Снегиревой С.Н., модификации древесины – Шамаева В.А., и др. Однако в настоящее время отсутствуют комплексные научные разработки в области регулирования технологических параметров фрезерного оборудования в зависимости от структуры древесины для декоративного фрезерования.

Целью работы является повышение производительности и качества декоративного фрезерования древесных элементов мебели путем разработки технологии адаптивного фрезерования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать физико-математическую модель процесса фрезерования древесины, учитывающей структуру поверхности.
2. Установить закономерности влияния макроструктуры древесины и технологических параметров процесса фрезерования на качество обрабатываемого

мой поверхности.

3. Разработать методику оптического распознавания структуры поверхности древесины вдоль траектории движения фрезы.

4. Разработать технологию адаптивного декоративного фрезерования поверхности древесины и рекомендации по ее применению в деревообрабатывающей промышленности.

Объект и предмет исследований. Объектом исследования является технология декоративного фрезерования древесины. Предметом исследования являются макроструктура поверхности древесины и технологические параметры процесса фрезерования.

Методологическая база исследований. В работе использованы методы имитационного моделирования, динамики частиц, оптического распознавания, Фурье-анализа, планирования и проведения экспериментальных исследований с использованием современных измерительных средств.

Научная новизна работы:

1. Разработана физико-математическая модель процесса фрезерования древесины, отличающаяся учетом структуры годичных слоев поверхности древесины.

2. Установлены закономерности формирования качественной поверхности древесины при ее фрезеровании, отличающиеся учетом параметров макроструктуры поверхности древесины и резонансных эффектов фрезерования.

3. Разработана методика оптического распознавания структуры поверхности древесины, отличающаяся возможностью определения ориентации волокон древесины в заданной точке траектории фрезерования.

4. Разработана технология адаптивного декоративного фрезерования, отличающаяся регулированием технологических параметров процесса на основе оптического анализа макроструктуры поверхности древесины.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Физико-математическая модель процесса фрезерования древесины, учитывающая структуру годичных слоев, позволяющая определить рациональные технологические параметры.

2. Закономерности формирования качества обработанной поверхности древесины при ее фрезеровании, позволяющие обосновать рациональные технологические параметры процесса.

3. Методика оптического распознавания структуры поверхности древесины, позволяющая определять направление волокон относительно траектории фрезерования.

4. Технология фрезерования с переменной скоростью подачи фрезы, позволяющая повысить качество обрабатываемой поверхности и производительность процесса на основе предварительного оптического анализа макроструктуры поверхности древесины.

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием репрезентативных теоретических и экспериментальных методов, хорошей сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, положительными результатами лабораторных экспериментов и производственных испытаний, подтверждением статической значимости результатов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость заключается в установлении влияния параметров макроструктуры древесины и технологических параметров процесса фрезерования на качество обрабатываемой поверхности и получении математической модели процесса фрезерования поверхности детали из древесины с заданной структурой годовичных слоев. Практическая значимость заключается в разработке новой технологии адаптивного фрезерования, обеспечивающей повышение производительности и качества обработки поверхности древесины различных пород и композиционных материалов на ее основе. Результаты диссертации используются на ООО "МИГмебель" (г. Воронеж), ОАО "Графское" (г. Воронеж), ООО "Доступная робототехника" (г. Воронеж) и в учебном процессе ФГБОУ ВПО "Воронежская государственная лесотехническая академия".

Личное участие автора заключается в обосновании темы, определении целей и задач работы, выполнении теоретических и экспериментальных исследований и анализе их результатов, разработке программных средств, подготов-

ке основных публикаций, практическом внедрении результатов диссертации.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности 05.21.05.

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.21.05 – Дровесиноведение, технология и оборудование деревопереработки, пункту 6 "Обоснование и оптимизация параметров и резервов работы оборудования деревообрабатывающих производств".

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: "Scientific Innovation and Sustained Development": 7 Congress of Scientific research Outlook in the Arab World (October, 2008. Fez. Morocco); "Инновации и энергосберегающие технологии в электроэнергетике: МИКТ (Воронеж, 2012 г.); "Интеллектуальные информационные системы": ВИВТ (Воронеж, 2011 г.); "Актуальные проблемы профессионального образования: подходы и перспективы": 10-ая Международная научно – практическая конференция (Воронеж, 2012 г.); "Перспективы инновационного развития современного мирового сообщества: экономико-правовые социальные аспекты": Международная юбилейная научно-практическая – конференция, ВГЛТА (Воронеж, 2012 г.). "Юбилейная научная конференция, посвященная 80-летию ВГЛТА" (Воронеж, 2010 г.).

Публикации. Основные научные разработки по теме диссертации опубликованы в 18 работах, включая 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, основных выводов и рекомендаций, списка использованных источников и приложений. Общий объем работы составляет 167 страниц, из них 146 страниц основного текста, 7 приложений, 60 иллюстраций, 10 таблиц и 119 наименований использованных источников, в том числе 6 иностранных.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА О ФРЕЗЕРОВАНИИ ДЕКОРАТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕБЕЛИ

1.1 Технологии фрезерования деталей мебели с элементами декора на станках с ЧПУ

Мебель с декоративными элементами мебели и сложным высокоэстетическим декором в настоящее время широко востребована в России, в арабских странах (в частности, в Ираке) и других странах (рисунок 1.1, *а*). Для создания декора широко используется фрезерование [11, 12]. Спросом пользуются как мебель с двумерной фрезерной обработкой (рисунок 1.1, *б*), так и трехмерной (рисунок 1.1, *в*). Фрезерование декоративных элементов – чрезвычайно сложный технологический процесс, требовательный к геометрическим параметрам и степени заточки фрезы, частоте вращения и скорости подачи фрезы, точности позиционирования и дискретности перемещения фрезы [80]. При декоративном фрезеровании на станках с ЧПУ фреза движется в пространстве по сложной траектории с одновременным изменением от двух до пяти координат (рисунок 1.2) [48].

На средних и крупных мебельных предприятиях, при крупносерийном производстве мебели, освоение новых декоративных элементов мебели требует больших трудозатрат и потерь древесины на отработку технологии [99, 119]. Для повышения управляемости процесса и повторяемости результатов до технологической операции фрезерования производят предварительную подготовку мебельных элементов. Она заключается в склейке отдельных заготовок со строго подобранной ориентацией волокон [13]. Большая часть декоративной обработки сводится к линейному фрезерованию профильными фрезами. При этом подача фрез производится преимущественно строго вдоль и строго поперек волокон [74]. Технологические параметры процесса, в первую очередь частоту вращения и скорость подачи фрезы, вдоль и поперек волокон подбирают опытным и экспертным путем. И на протяжении длительного времени технологические режимы корректируют для повышения производительности, уменьшения

шероховатости поверхности, исключения брака [76].



а



б



в

Рисунок 1.1 – Мебель с арабским (*а*), двумерным (*б*) и трехмерным (*в*) узором



a



б

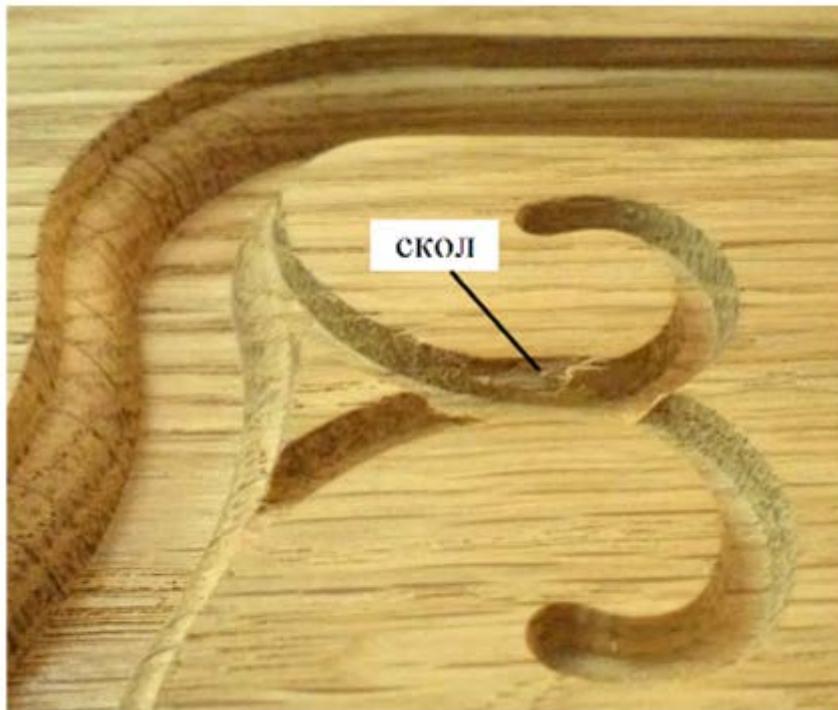
Рисунок 1.2 – Участок фрезерования со станком с ЧПУ (а) и пульт управления станком (б)

На малых мебельных предприятиях возникают серьезные проблемы с фрезерованием декоративных элементов. При мелкосерийном и позаказном производстве нет возможности предварительно отработать технологические режимы опытным путем. Поэтому обычно фрезерование производится с постоянными технологическими параметрами (скорость подачи, частота вращения фрезы), которые в целом обеспечивают приемлемую шероховатость поверхности, производительность, и довольно низкий процент брака. Однако из-за анизотропии структуры механические свойства, а, следовательно, и качество обработки поверхности, оказываются различными вдоль и поперек волокон. И в мелкосерийном производстве нет возможности экспериментальным путем подобрать алгоритм изменения технологических параметров в процессе декоративной обработки элемента мебели.



Рисунок 1.3 – Внешний вид типичной детали мебельного производства с декоративным узором

При крупносерийном производстве режимы линейного фрезерования профильными фрезами хорошо отработаны. Но при фрезеровании частей декора с малым радиусом кривизны (рисунок 1.3) из-за несоответствия технологических параметров локальной структуре поверхности, часто образуются сколы и другие дефекты, приводящие к браку или требующие дополнительных операций восстановления элементов мебели (рисунок 1.4).



a



б

a – скол при движении фрезы вдоль волокон с завышенной скоростью; *б* – качественно обработанная канавка при использовании переменной скорости фрезерования

Рисунок 1.4 – Результат фрезерования узора

Дополнительные проблемы возникают при обработке малоценной древесины, которая имеет низкие механические свойства и существенную неоднородность структуры, и поэтому более требовательна к режимам фрезерования. Также в последние годы пользуется спросом мебель из древесины с целевыми пороками (в частности, сучками), представляющими эстетическую ценность. Области древесины вблизи порока также чувствительны к режимам фрезерования.

Поэтому чрезвычайно актуальной задачей для мебельного производства является учет локальной макроструктуры древесины в процессе фрезерования. В идеале, необходимо анализировать локальную макроструктуру древесины вдоль траектории движения фрезы в режиме реального времени и корректировать соответствующим образом технологические параметры процесса. Данной цели и посвящено предлагаемое диссертационное исследование.

Рассмотрим далее современное состояние основных аспектов, касающихся декоративного фрезерования.

1.1.1 Особенности и назначение декоративных элементов мебели

Как отмечает Барташевич А.А. [12], своеобразие формы изделия достигается декоративными элементами. Для этих целей используются различные свойства материалов или специальные приемы декорирования. Придание изделию соответствующего внешнего вида называется декорированием [101]. Повышению эстетических качеств современной корпусной мебели способствуют различные компоновочные и планировочные решения, такие как использование широкой гаммы средств декоративного оформления фасадных элементов изделий (из древесины, полимеров, декоративного стекла, сплавов цветных металлов, чеканки по металлу и т.д.), разнообразие в сочетании цвета и отделки [101].

Отделка мебели включает все виды обработки поверхности, направленные на совершенствование декоративно-художественных свойств изделий [90] и их защиту от влияния внешней среды является важнейшим критерием эстети-

ческой оценки ее качества [64, 65].

В работе [12] классифицируют отделку мебели по функциональному назначению на защитную, декоративно-защитную и декоративно-художественную. Одним из средств декоративно-художественной отделки является создания рельефа поверхности мебельного элемента.

Вследствие того, что декоративно-художественные достоинства древесины определяются ее цветом и текстурой, т.е. совокупностью физических свойств поверхности древесины, ее природным строением, формой ствола и методом обработки, то обработка древесины должна осуществляться художественно-конструкторскими методами с учетом эстетических свойств используемых материалов, а также эксплуатационных, функциональных, технико-экономических и требований к изделию [19].

Таким образом, при внедрении нового декора для сокращения затрат целесообразно использовать современное программное обеспечение для векторизации фотографий декоративных элементов мебели с последующей автоматизированной разработкой управляющих программ для станков с ЧПУ.

1.1.2 Технологии производства декоративных элементов мебели

В базовой литературе по технологии производства декоративных элементов мебели [12, 22] выделяют следующие технологии:

- крашение красителями, протравное окрашивание и отбеливание [64];
- тиснение рельефных рисунков по древесностружечной плите, облицованной натуральным шпоном или пленками на основе пропитанных бумаг [12];
- использование рельефных (объемных) декоративных элементов из прессованной древесины [10, 115];
- дробеструйная или пескоструйная обработка поверхности для нанесения сложных декоративных рисунков [15];
- использование фотоконтактной печати (шелкографии) [11];
- получение на щитовых деталях декоративных рельефных рисунков методом прессования [100, 102–104, 106, 107];

- мозаика, резьба и роспись [24];
- использование накладных декоративных элементов [23];
- горячее тиснение древесины [17, 20, 79];
- украшение мебели вставными элементами (керамика, плетение, самоцветные камни, янтарь, металлические пластины, витражи [11, 12];
- выжигание [99];
- аэрография (роспись мебельных фасадов рисунками по заранее выбранному шаблону при помощи распылителя [119].

Перечисленные технологии характеризуют все многообразие методов производства декоративных элементов мебели [93, 116]. Однако запросы покупателей мебели в России и Ираке требуют большого разнообразия индивидуальных рисунков декоративных элементов мебели в соответствии с желанием потребителей. Кроме того, в большинстве случаев указанные технологии требуют дополнительной оснастки и продолжительной предпроизводственной подготовки.

Таким образом, автоматизированные технологии производства декоративных элементов мебели должны быть адаптивными, самонастраивающимися для каждого индивидуального заказа декоративного рисунка и обеспечивать высокую производительность технологического потока производства лицевых панелей мебели с различным декором [19].

1.2 Проблема выбора технологических параметров при декоративном фрезеровании древесины

При декоративном фрезеровании элементов мебели необходимо изменять технологические параметры по мере движения фрезы в зависимости от локальных особенностей формируемого декора и структуры материала. Проанализируем основные технологические параметры, условия их выбора, и их влияние на качество формируемой поверхности.

Фрезерование представляет собой частный случай обработки материалов

резанием [70, 71]. Различают два основных вида фрезерования: тангенциальное и радиальное [45, 82]. При тангенциальном фрезеровании режущие лезвия вращающегося цилиндрического инструмента образуют обработанную поверхность параллельно оси его вращения. При радиальном фрезеровании лезвия вращающегося инструмента (фрезы) образуют обработанную поверхность перпендикулярно к оси его вращения. Наиболее распространенным режущим инструментом, применяемым для обработки на фрезерных станках с ЧПУ заготовок широкой номенклатуры, являются концевые фрезы [21]. При обработке тонких плоских заготовок используются праворежущие фрезы с левой спиралью и леворежущие с правой спиралью, так как осевая составляющая усилия резания прижимает заготовку к столу станка, улучшая условия обработки. Для уменьшения вибрации при обработке зубья фрезы часто располагают несимметрично. Жесткость режущей части фрезы можно повысить, увеличив сечение сердечника либо применив конический сердечник. При обработке наклонных стенок применяют различного вида конические концевые фрезы, параметры которых определяются конфигурацией декоративного элемента мебели. Концевые радиусные фрезы используют при обработке пространственных поверхностей методом строчечного фрезерования. Материал, геометрию режущей части и число зубьев фрезы выбирают по нормативам, которые применяют для определения параметров режущего инструмента, используемого на станках с ЧПУ [32].

Важнейшим технологическим параметром, существенно влияющим на качество обработки, является скорость резания v (м/мин), которая определяется окружной скоростью наиболее удаленных от оси вращения инструмента точек режущего лезвия [66, 73, 86]:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}, \quad (1.1)$$

где D – диаметр окружности вращения режущего лезвия (в частном случае – диаметр фрезы), мм;

n – частота вращения инструмента (скорость резания), об/мин.

Однако для профильных фрез с кромкой сложной геометрической формы диаметр D вдоль оси фрезы может изменяться в 3–5 раз (для конических фрез различие еще существеннее). Поэтому при движении такой фрезы скорость резания также различается в 3–5 раз по глубине обработки, что необходимо учитывать при разработке алгоритма движения фрезы для управляющей программы станка с ЧПУ.

Путь, проходимый заготовкой относительно фрезы или фрезой относительно заготовки в единицу времени называют подачей s . Существует три вида подач:

1) подача на зуб s_z (мм/зуб) – перемещение заготовки за время поворота фрезы на один зуб.

2) подача на оборот s_o (мм/об) – перемещение заготовки за время поворота фрезы на один оборот.

3) минутная подача s_m (мм/мин) – перемещение заготовки за 1 мин.

Указанные подачи рассчитываются по следующим формулам:

$$s_o = s_z \cdot z; \quad s_m = s_o \cdot n = s_z \cdot z \cdot n. \quad (1.2)$$

Такой параметр как глубина резания t определяется толщиной слоя материала заготовки (мм), срезаемого за один рабочий ход.

При фрезеровании изотропных материалов (металлы, МДФ и др.) нет необходимости изменять подачу и глубину резания по мере движения фрезы, а правила выбора данных технологических параметров довольно просты и нормированны. Однако при обработке материалов с существенно неоднородной структурой и соответственно физико-механическими свойствами, данные параметры, в идеальном варианте, должны адаптироваться под локальные условия обработки.

Площадь поперечного сечения среза при цилиндрическом фрезеровании определяется по значениям следующих параметров: ψ_k – угол контакта фрезы – центральный угол, соответствующий дуге соприкосновения окружности фрезы с заготовкой, измеряемый в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы; θ – цен-

тральный угол между двумя соседними зубьями фрезы, $\theta = \frac{360^\circ}{z}$.

Число зубьев, одновременно находящихся в работе определяется по формуле:

$$m = \frac{\Psi_k}{\theta} = \frac{\Psi_k \cdot z}{360}. \quad (1.3)$$

Максимальная толщина срезаемого материала находится из формулы:

$$a_{\max} = s_z \sin \Psi_k. \quad (1.4)$$

Значение F_{cp} используется для определения силы резания при фрезеровании.

Среднее значение площади поперечного сечения среза F_{cp} определяется в зависимости от числа зубьев, одновременно находящихся в контакте

$$F_{cp} = f \cdot m, \quad (1.5)$$

где f – площадь поперечного сечения слоя, срезаемого одним зубом.

Каждый зуб фрезы при фрезеровании преодолевает сопротивление резанию со стороны материала детали и силы трения, действующие на поверхностях зубьев фрезы [67, 95]. В контакте с заготовкой, как правило, находится два и более зубьев. Из-за этого фреза преодолевает некоторую суммарную силу резания, складывающуюся из сил, действующих на эти зубья [92]. На каждый зуб фрезы, находящийся в пределах угла контакта, действует своя сила сопротивления срезаемого слоя. Каждую из этих сил можно разложить на составляющие, действующие тангенциально (по касательной) к зубьям фрезы и по радиусам фрезы [71].

Окружная сила $P_{ок}$ (главная составляющая силы резания) – определяется по формуле

$$P_{ок} = \frac{C_p \cdot t^{x_p} \cdot s_z^{y_p} \cdot B \cdot z}{D^{q_p}}, \quad (1.6)$$

где C_p – постоянный коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала, типа фрезы и ее геометрии;

x_p , y_p и q_p – показатели степени, также зависящие от механических характеристик обрабатываемого материала, типа и геометрии фрезы;

B – ширина фрезерования.

Значения показателей x_p , y_p и q_p приводятся в справочной литературе по выбору параметров режимов резания. Зная $P_{ок}$, определяют значения отдельных составляющих силы резания, по которым выбирают фрезу, оправку, способ закрепления заготовки, жесткость и мощность станка.

Однако формула (1.6) может быть использована только для линейного фрезерования изотропных материалов, а для декоративной обработки (при движении профильной фрезы по сложной траектории) древесины (материала со сложной пространственно неоднородной структурой), формула имеет лишь приближенный и оценочный характер. Причина в том, что в данной формуле многие параметры в зависимости от локальной структуры древесины могут изменяться до 20 раз, а из-за сложной геометрической формы зубьев фрезы и сложной траектории движения фрезы в пространстве – до 10 раз. Поэтому при декоративном фрезеровании древесины необходимо учитывать как локальную структуру, так форму фрезы и локальные особенности ее перемещения.

Таким образом, при декоративном фрезеровании древесины большой проблемой является выбор технологических параметров из за непрерывного изменения локальной структуры, локальных особенностей перемещения фрезы, сложной формы фрезы. Использование одних и тех же, оптимальных, технологических параметров для обработки всей заготовки приводит к различному качеству формируемой поверхности и высокой вероятности разрушения поверхности. Поэтому в идеальном варианте необходимо управлять технологическими параметрами в зависимости от локальных условий фрезерования.

1.3 Управляющие программы для фрезерования декоративных элементов мебели

Разработка новых элементов декора требует значительных затрат времени и средств на разработку или модификацию программы, управляющей станком с ЧПУ [14, 18, 49]. Управляющая программа (УП) содержит числовые данные, необходимые для изготовления детали, и представляет собой пошаговый алгоритм этого процесса [9, 16]. Она считывается и интерпретируется системой управления станка, поэтому деталь изготавливается автоматически, без участия человека. Аппаратная часть системы ЧПУ состоит из блока управления и самого станка [81, 90].

Система управления реализует две основные функции: считывание программы обработки детали и управление работой станка [4, 19]. Соответственно она состоит из двух функциональных блоков:

- модуль обработки данных;
- система автоматизированного регулирования (САР).

В функции модуля обработки данных входит считывание УП с используемого носителя информации, декодирование операторов программы, преобразование декодированной информации в команды управления станком и данные о положении инструмента по каждой из осей станка, направлении его движения, подаче и т.д., а также передача всех этих данных в САР [19].

САР, в свою очередь, принимает информацию от модуля обработки данных и преобразует ее в электрические управляющие сигналы, при помощи которых производится управление приводными механизмами станка.

Процесс написания программ представляет собой кодирование информации в соответствии с определенными правилами которой может восприниматься системой управления станка [19]. При ручном написании программ необходимо закодировать требуемую последовательность команд. Это очень трудоемкий процесс и прежде всего потому, что программа должна описывать движение инструмента, а не контур детали [61]. Другими словами программист

должен рассчитывать координаты перемещения центра инструмента. Кроме того, ему придется задавать большое количество вспомогательных точек. Несмотря на то, что в современных системах управления существуют функции автоматической коррекции контура детали на режущий инструмент, ручное составление программ остается трудоемким процессом [96].

Для облегчения процесса составления УП разработаны специальные языки высокого уровня [16]. При их использовании программисту достаточно определить геометрию детали, общую траекторию движения инструмента и технологические параметры инструмента и режимов резания [81].

В работе Гжирова Р. И. и Серебrenицкого П. П. [21] подчеркнута важность обеспечения технологических требований обработки материала в процессе формирования траектории движения инструмента. Несоблюдение таких требований приводит к искажению геометрических свойств контура детали, ухудшению чистоты поверхности реза, а в некоторых случаях к выходу из строя режущего инструмента и станка. Из-за этого алгоритмы автоматического формирования траектории не всегда могут обеспечивать полное и безошибочное соблюдение всех требований технологического процесса.

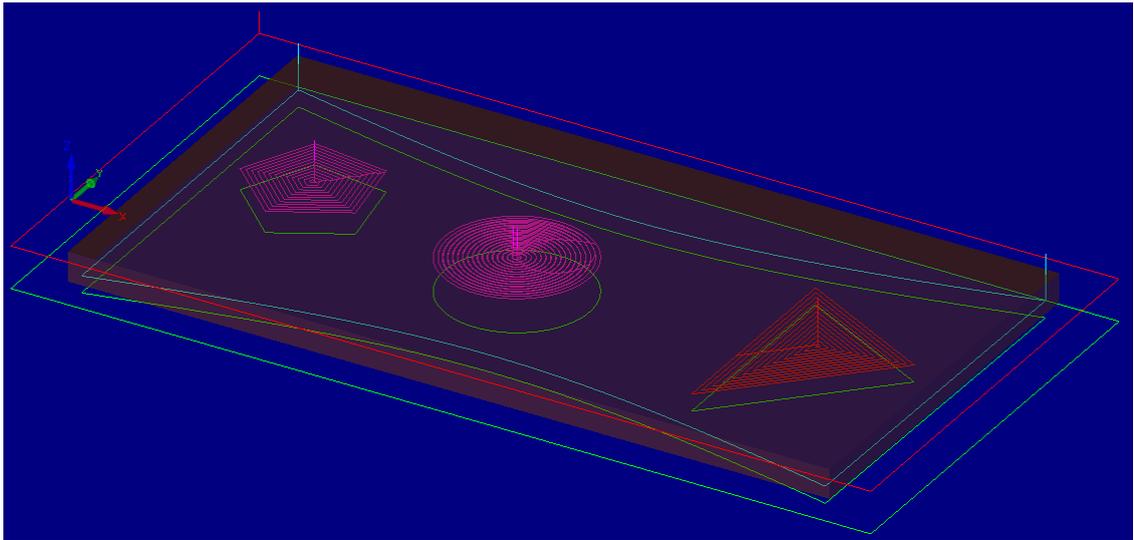
В работе [16] Босинзон М. А. отмечает, что математическая модель изделия мебели включает в себя большой объем разных и структурно разбросанных геометрических данных об отдельных составных элементах – деталях, что не является критичным при дизайнерском и конструкторском проектировании, но становится проблемой при переходе к проектированию технологических процессов обработки. Для проектирования УП необходимо в автоматическом режиме выполнить так называемую предпроцессорную обработку модели, т.е. выделить обрабатываемые контура и поверхности, а также найти и локализовать потенциально ошибочные элементы и места их сопряжения [96]. Кроме того, конструкционные свойства основного мебельного материала (ДСтП, МДФ) накладывают ряд ограничений на геометрические параметры обрабатываемых контуров [25, 26, 50].

В монографии [63] отмечается, что для позаказного и мелкосерийного

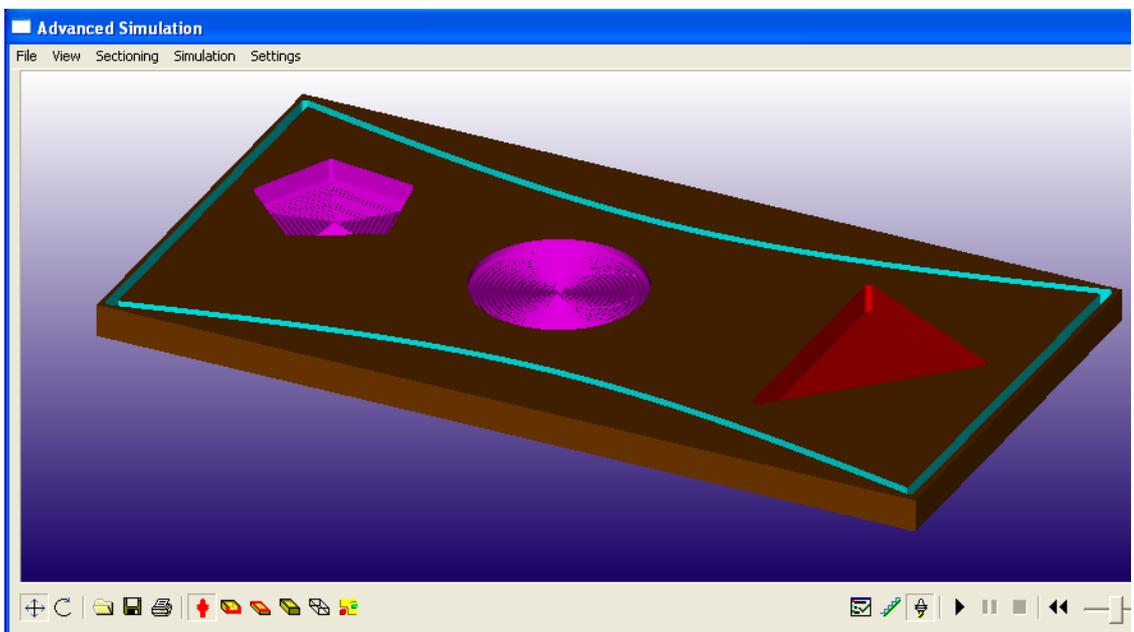
производства мебели с индивидуальными рисунками декора возникает необходимость в разработке технологий быстрой подготовки заданий для станка с ЧПУ и управления технологическими параметрами в процессе фрезерования, однако, в настоящее время данная технология не достаточно разработана для широкого применения в производстве.

Определение рациональной траектории рабочих перемещений инструмента при фрезеровании конкретной зоны является наиболее трудной проблемой при разработке операционного технологического процесса на станках с ЧПУ [7, 35]. Характер траектории зависит от вида зоны, метода фрезерования и типа инструмента. С помощью расчетов координат опорных точек и режимов резания, а также имеющихся технических решений составляют операционную расчетно-технологическую карту. Она содержит законченный проект обработки заготовки на станке с ЧПУ в виде графического изображения траектории и вектора движения центра фрезы с необходимыми пояснениями и таблицы, в которую занесены режимы обработки, отдельные технологические команды, параметры инструмента. В современных САМ системах проект обработки заготовки выглядит как на рисунке 1.5, а. Цвет обрабатываемого контура соответствует выбранному для его фрезерования инструменту. Из рисунка 1.5 следует, что обработка заготовки идет тремя фрезами по пяти контурам. Сформированная управляющая программа перед внедрением ее в производство проходит серию проверок, которые включают в себя симуляцию ее работы в специальной программе (рисунок 1.5, б), отработку программы без установки режущего инструмента, оснастки и заготовки, пробную обработку заготовки с применением требуемой оснастки и инструмента, обработку контрольной заготовки.

В современных станках с ЧПУ, используемых для создания декоративных элементов мебели широко используются программные системы автоматизированного проектирования (САПР) и систем автоматизированного производства (САП), экономящие временные и производственные ресурсы и повышающие качество выпускаемых изделий [16, 29]. Данные технологии эффективны только при массовом поточном производстве простых элементов декора.



a



б

Рисунок 1.5 – Пример расчетно-технологической карты заготовки в AlphaCAM (а) и результат обработки тестовой заготовки в модуле симуляции AlphaCAM

При позаказном производстве декоративных элементов мебели с использованием станков с ЧПУ существует два варианта обработки входных данных [52]. В первом варианте необходимо сканировать образец элемента декора, выбранного заказчиком, выбрать конкретную конструкцию, провести предвари-

тельную подготовку для станка с ЧПУ и передать задание на исполнение [55, 69, 97] (рисунок 1.6).

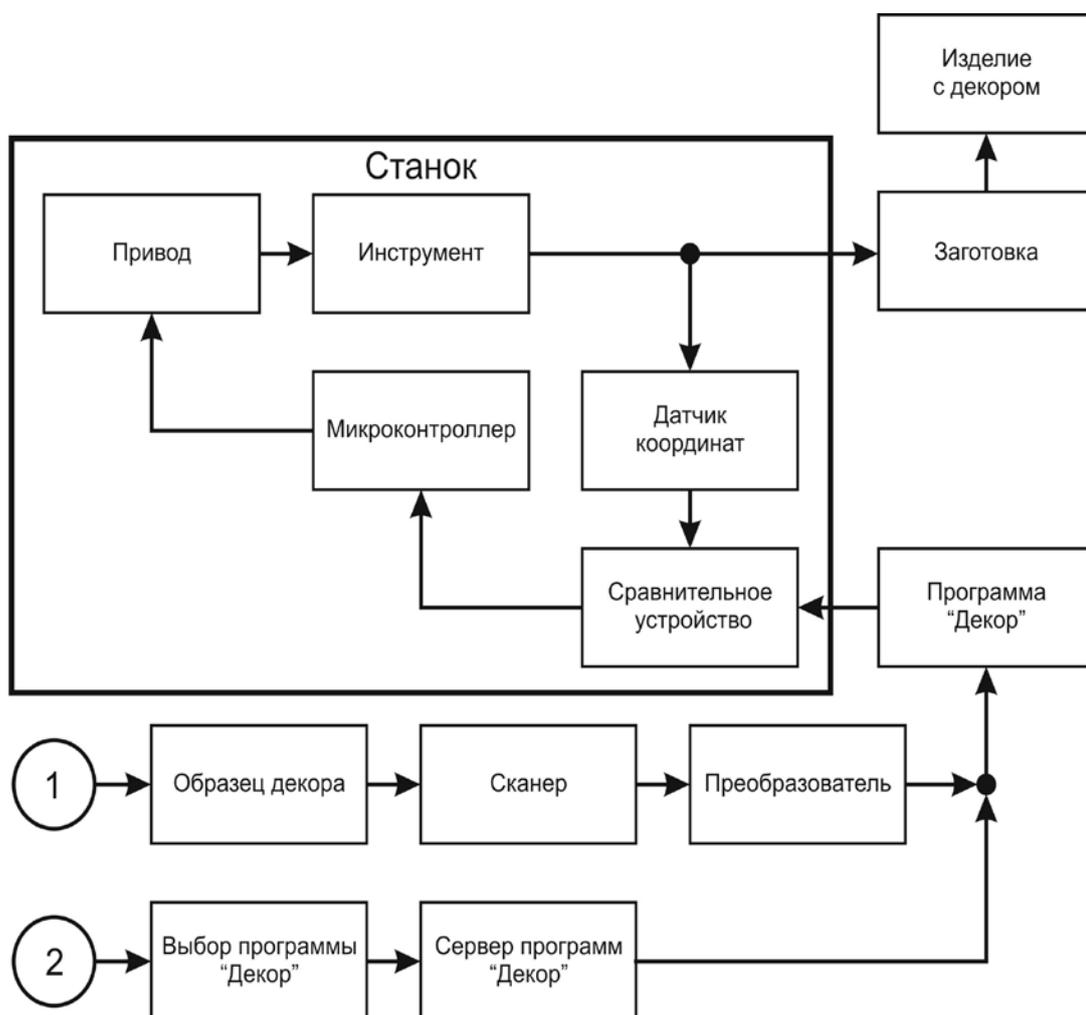


Рисунок 1.6 – Структурная схема станка с ЧПУ для производства декоративных элементов мебели

Во втором варианте необходимо выбрать готовую программу изготовления декоративных элементов мебели из базы данных программы «Декор». Данная программа может редактироваться с учетом пожелания заказчика: выбор орнамента, украшений; изменение отделки и т.д [35, 38, 55]. После формирования кода для станка с ЧПУ сигналы поступают в устройство сравнения, которое сравнивает информацию от датчиков координат по трем направлениям X , Y , Z с исходным кодом в реальном масштабе времени. После устройства сравнения код управления передается на микроконтроллер станка с ЧПУ [52]. Микрокон-

троллер осуществляет управление процессом изготовления детали. Управляющее воздействие с микроконтроллера передается на электропривод станка через средства автоматики (пускатели, и т.д.). Привод станка с ЧПУ осуществляет подачу и рабочий ход инструментов (пилы, сверла, фрезы). Положение рабочего инструмента контролируется датчиками координат X , Y , Z . Эти координаты сравниваются с координатами заданными по программе «Декор» в устройстве сравнения. Если появляется отклонение по какому-либо направлению, то на микроконтроллер поступает команда на устранение ошибки. На выходе из станка с ЧПУ появляется готовая деталь элемента декора – заготовка, которая затем проходит дальнейшую обработку: покраску, склеивание, соединение с другими деталями и т.д [61]. Недостатком данного способа обработки данных является отсутствие в структурной схеме станка с ЧПУ блока обратной связи, учитывающего особенности объекта обработки.

Таким образом, при позаказном и мелкосерийном производстве декоративных элементов мебели трудоемкой задачей является разработка управляющей программы для каждого нового элемента. Существующие на настоящий момент управляющие программы имеют такие недостатки, как низкая универсальность, необходимость ручной коррекции, отсутствие обратной связи в процессе фрезерования.

1.4 Анизотропия структуры древесины и необходимость ее учета при фрезеровании древесины

В процессе фрезерования мебельных элементов из древесины, ориентация древесины в приповерхностном слое существенно изменяется в пределах одной детали [13, 74]. Механические свойства поверхности древесины существенно зависят от её макроструктуры [112]. К настоящему времени влияние ориентации волокон на первичные физико-механические свойства (плотность, твердость, прочность и т.п.) подробно изучено [68, 83].

С точки зрения физического материаловедения древесина является анизо-

тропным материалом. Из-за выраженной осевой симметрии ствола древесины, преимущественной ориентации структурных элементов вдоль оси ствола, наличия годовичных слоев, наблюдается существенное различие свойств древесины в продольном, радиальном и тангенциальном направлениях.

В сравнительном исследовании [77] изучена прочность древесины различных пород на растяжение в трех направлениях: вдоль волокон, поперек волокон в радиальном и тангенциальном направлениях (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Прочность древесины (влажность 12 %) при растяжении
вдоль волокон

Порода	Предел прочности, МПа при растяжении:		
	вдоль волокон	поперек волокон в радиальном на- правлении	поперек волокон в тангенциаль- ном направле- нии
Лиственница	124	5,6	5,2
Сосна	109	5,4	3,5
Ель	101	5,0	3,2
Кедр	89	4,2	2,8
Пихта сибирская	66	4,0	2,9
Акация белая	171	9,0	4,2
Береза	137	8,0	6,5
Ясень	140	13,3	8,4
Граб	129	13,3	9,2
Осина	121	12,5	8,5
Бук	124	11,1	6,5
Липа	117	8,3	5,0
Ольха	97	7,2	5,9
Тополь	88	7,1	4,6

Анализ данных, представленных в таблице 1.1 показывает, что средний предел прочности древесины вдоль волокон составляет около 130 МПа, однако резко снижается даже при малом отклонении волокон от продольного направ-

ления. Прочность древесины вдоль волокон примерно в 20 раз больше прочно-сти поперек волокон. В поперечном направлении прочность больше в радиаль-ном направлении, чем в тангенциальном (у хвойных пород на 10–50 %, у лист-венных на 20–70 %). Хвойные породы по сравнению с лиственными имеют су-щественно меньшую прочность при растяжении в поперечных направлениях (в радиальном и тангенциальном).

Статическая твердость древесины различается в зависимости от ориента-ции поверхности в меньшей степени, однако различие также существенно [94]. Статическая твердость торцевой поверхности выше, чем боковых поверхностей у хвойных пород в среднем на 40 %, у лиственных – на 30 %. Так, например, для сосны твердость торцевой поверхности (28,4 Н/мм²) превышает твердость радиальной (22,5 Н/мм²) и тангенциальной (23,2 Н/мм²) поверхностей на 20–25 % (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Статическая твердость древесины (влажность 12 %) [94]

Порода	Твердость древесины на поверхности, Н/мм ²		
	Торцевой	радиальной	тангенциальной
Сосна	28,4	22,5	23,2
Ель	25,3	17,5	17,8
Ясень	78,3	57,1	65,1
Дуб	66,5	54,5	47,5
Бук	65,1	53,2	49,5
Береза	46,3	35,9	32,1
Осина	25,8	18,7	19,6

Для большинства пород нет существенного различия между твердостью радиальной и тангенциальной поверхностями. В то же время у пород с хорошо развитыми сердцевинными лучами (дуб, бук) твердость радиальной поверхно-сти на 5–10 % выше, чем твердость тангенциальной поверхности [34, 51, 94].

По данным ЦНИИМОДа, ориентация волокон древесины существенно влияет на её износостойкость. В частности, для древесины сосны показатель истирания поверхности поперечного разреза (0,12) более чем в два раза меньше показателей для поверхностей радиального (0,31) и тангенциального (0,28) разрезов [94]. Близкое соотношение показателей истирания наблюдается и для березы – 0,13, 0,26, 0,29 соответственно.

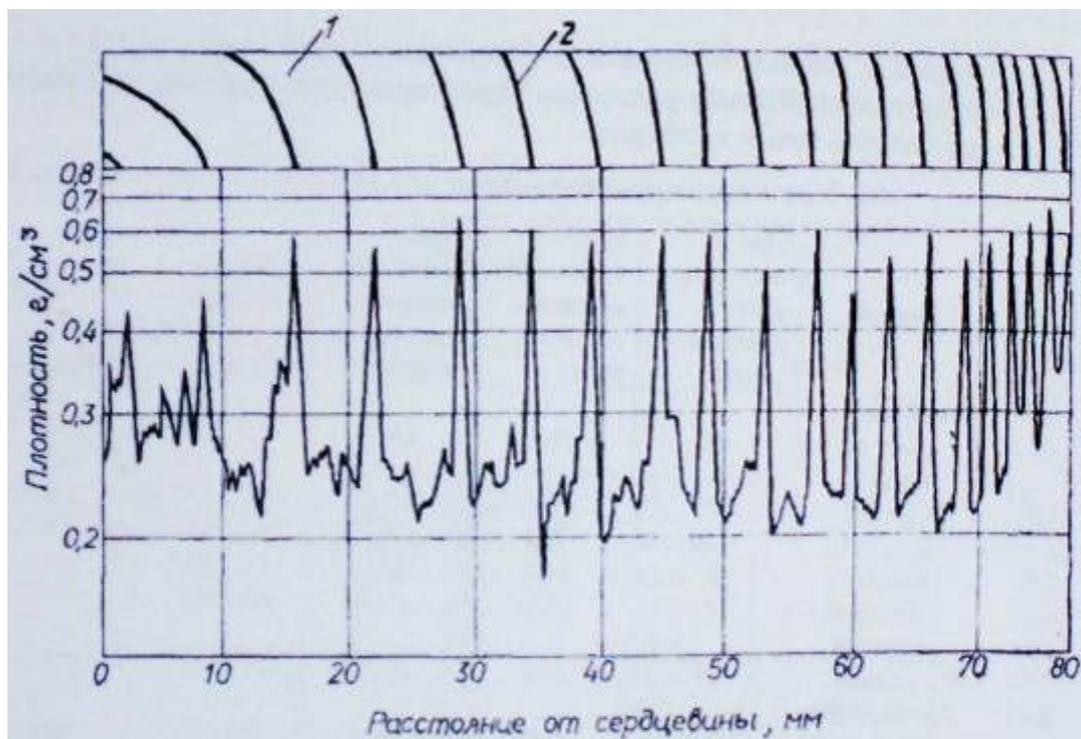
Сопротивление древесины раскалыванию также может зависеть от ориентации поверхности. Для ряда пород (акация белая, бук, дуб, береза, липа) сопротивление раскалыванию существенно отличается в радиальной и тангенциальной плоскостях – на 20–40 % [94]. Для хвойных же пород (сосна, ель сибирская, и др.) различия в радиальной и тангенциальной плоскостях практически нет.

Приведенные выше данные рассматривались в предположении, что свойства древесины зависят только от направления по отношению к оси симметрии. Однако для реальных изделий из древесины механические свойства существенно изменяются и в пределах изделия. Так, например, плотность древесины существенно изменяется вдоль радиуса ствола (рисунок 1.7), особенно у хвойных и кольцесосудистых лиственных пород [94]. Помимо квази-периодических пиков плотности от годовичных колец, средняя плотность изменяется по радиусу на 30–50 %, и можно говорить о различных свойствах сердцевины, ранней и поздней зонах. При фрезерной обработке древесного элемента мебели на поверхность выходят участки с различной средней плотностью и различным расстоянием между годовичными слоями, поэтому локальные условия работы фрезы существенно различны.

Ширина годовичного слоя в пределах одной детали мебели может изменяться в широких пределах. Так, например, для сосны обыкновенной ширина годовичного кольца в пределах одного среза изменяется от 1 до 4 мм (рисунок 1.8) [42].

Из графиков видно, что ширина годовичного слоя на этапе формирования ювенильной древесины резко увеличивается до возраста 5–12 лет, где она име-

ет максимальное значение (около 4 мм). Затем происходит уменьшение показателя ширины в два этапа. Приблизительно с 60 лет начинается процесс стабилизации, совпадающий с этапом зрелой дефинитивной древесины.



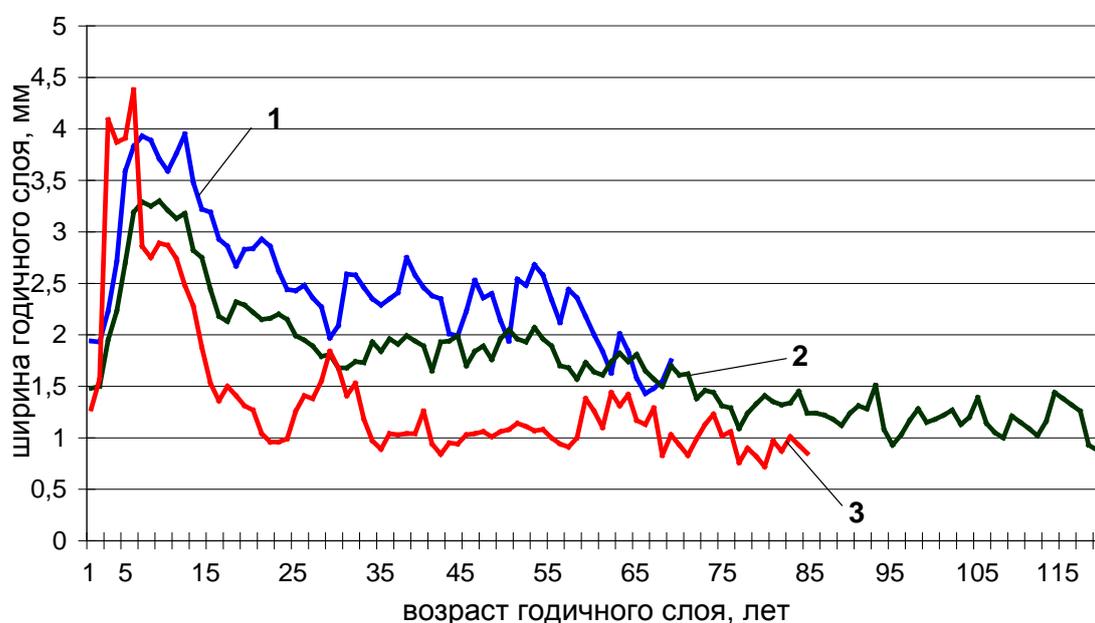
1 – ранние зоны; 2 – поздние зоны годовых слоев

Рисунок 1.7 – Изменение плотности древесины вдоль радиуса ствола смолистой сосны, измеренное методом поглощения β -лучей [6, 94]

Ранняя и поздняя зоны древесины сосны претерпевает значительные изменения на протяжении всей жизни дерева, и повторяют динамику изменения с возрастом ширины годового слоя (рисунок 1.9) [42]. Ширина поздней зоны в процессе жизни дерева изменяется поэтапно и, в целом повторяет изменения общей ширины годового слоя. Однако колебания ширины поздней зоны имеют меньшие амплитуды, чем для зависимости общей ширины годового слоя. Ширина поздней зоны слабо зависит от условий внешней среды и является генотипически обусловленным признаком.

Исследования [117] показывают, что свойства древесины существенно

изменяются по радиусу ствола. В поперечном срезе древесины заметно изменяется микроструктура древесины [42]. Так, диаметр трахеид *Pinus sylvestris* L. изменяется от ранней древесины к поздней на 10–15 % (таблица 1.3). В зоне широколиственных лесов средний диаметр поздних трахеид составляет 41,6 мкм, ранних трахеид – 46,3 мкм. В южной лесостепи (Воронежская область) средний диаметр поздних трахеид составляет 34,7 мкм, а ранних – 39,3 мкм. Наиболее низкие значения диаметра трахеид отмечаются для произрастания в сухой степи: средний диаметр поздних трахеид 32,4 мкм, диаметр ранних трахеид – 34,7 мкм.

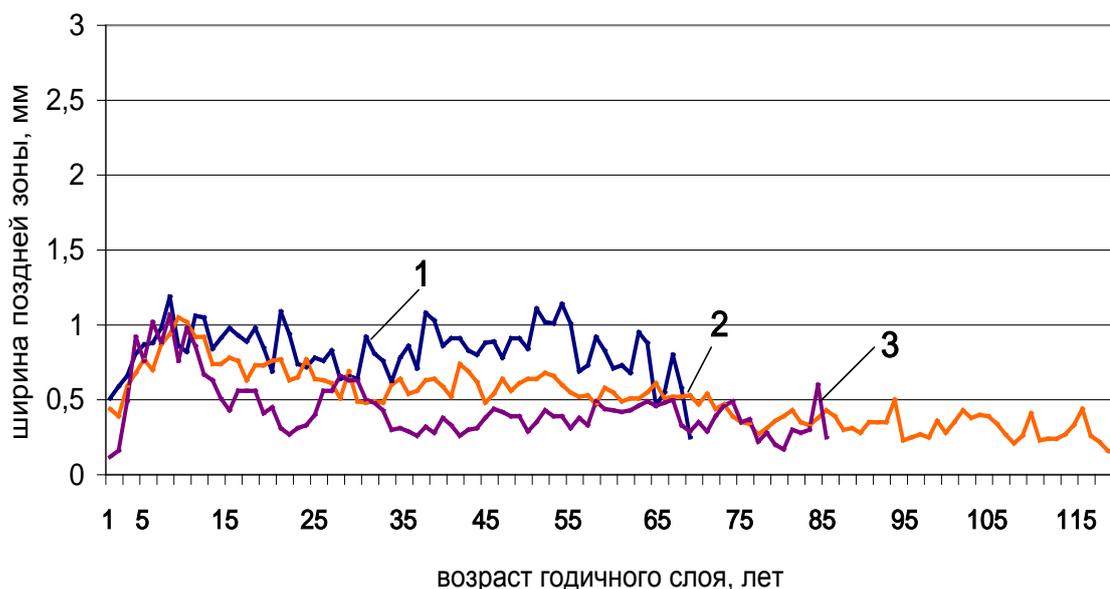


1 – зона широколиственных лесов; 2 – южная лесостепь; 3 – сухая степь

Рисунок 1.8 – Ширина годичного слоя древесины сосны в онтогенезе [42]

У лиственных кольцесосудистых пород, в частности, каштана посевного, также наблюдается существенная неоднородность плотности древесины в пределах среза. Плотность оказывает влияние на большинство механических свойств древесины (в частности, предел прочности возрастает с увеличением плотности) и является важным показателем качества древесины. В работе [87] были исследованы деревья каштана посевного одного возраста (115–120 лет),

произрастающие в Краснодарском крае (Пшишский лесхоз), с дисперсией по вертикальной зональности (500, 900 и 1200 м над уровнем моря).



1 – зона широколиственных лесов; 2 – южная лесостепь; 3 – сухая степь

Рисунок 1.9 – Изменчивость ширины поздней зоны древесины сосны в онтогенезе

Анализируя динамику плотности древесины лиственной кольцесоудистой породы в онтогенезе (рисунок 1.10), можно сделать следующие выводы. В раннем возрасте плотность древесины сначала увеличивается, достигая максимума к 20 годам, затем постепенно снижается. Судя по графику, изменение плотности от центральной части поперечного среза к периферии достигает 30–45 %.

Кроме того, в зависимости от высоты произрастания деревьев, плотность, и по-видимому, многие другие свойства, могут различаться до 10 % и более (судя по различию кривых 1 и 3 на рисунке 1.10). Поэтому при декоративном фрезеровании в одних и тех же режимах заготовок одной и той же породы, качество обработки поверхности может также заметно различаться.

Плотность древесины существенно зависит от ширины годичного слоя (рисунок 1.11) [87]. Зависимостью близка к линейной (вида $y = ax + b$), где значения коэффициента a различны в зависимости от высоты над уровнем моря:

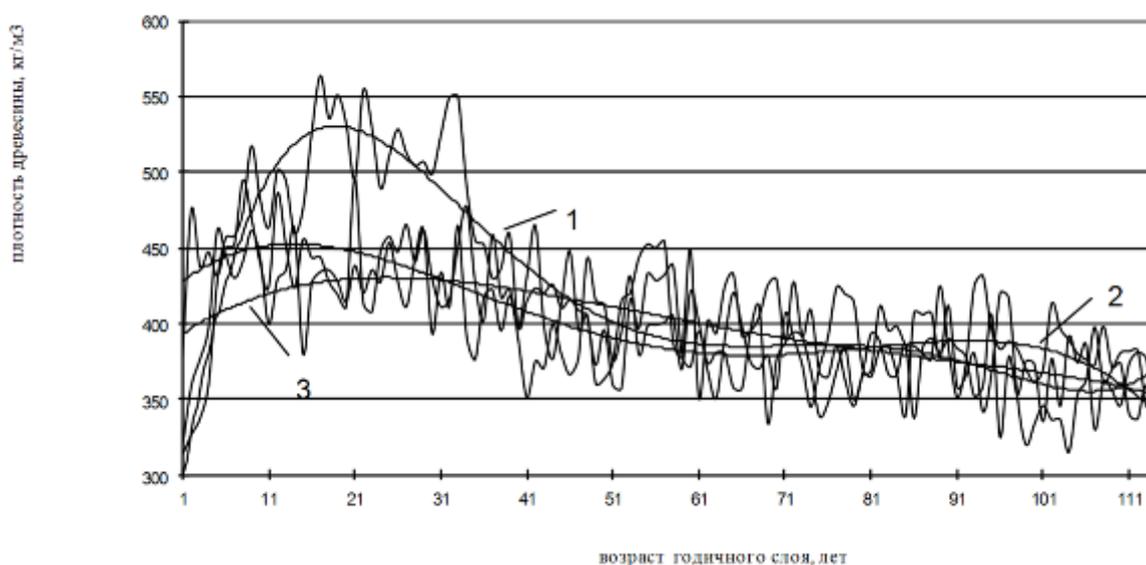
чем выше высота, тем эти значения ниже, следовательно, и плотность меньше. Линейная зависимость наблюдается также между плотностью древесины и шириной зоны поздней древесины и процентом поздней древесины.

Таблица 1.3 – Диаметр трахеид *Pinus sylvestris* L. в различных лесорастительных зонах, мкм

Лесорастительная Зона	Поздняя древесина			Ранняя древесина		
	макс.	мин.	сред.	макс.	мин.	сред.
1	2	3	4	5	6	7
Зона широколиств. лесов	50,8	32,3	41,6±0,63	55,4	37,1	46,3±0,62
V%			7,6			6,7
Южная лесостепь	41,6	27,7	34,7±0,47	46,2	32,3	39,3±0,47
V%			6,0			6,0
t ₁			8,8			9,0
Сухая степь	37,0	27,7	32,4±0,32	41,6	27,7	34,7±0,47
V%			4,9			6,0
t ₂			4,0			6,9
t ₃			13,0			14,9

Из-за существенного влияния структуры древесины на ее физические свойства к настоящему времени разработаны высокотехнологичные неразрушающие методы определения внутреннего строения древесины [91, 108, 109].

В модифицированной древесине [27, 78, 110, 113, 114] также наблюдается существенная анизотропия механических свойств. В экспериментальных исследованиях древесины березы, пластифицированной карбамидом, установлено существенное различие модулей упругости в различных направлениях (радиальное, тангенциальное, вдоль волокон), таблица 1.4 [40, 41, 111].



1 – высота произрастания 500 м над уровнем моря; 2 – 900 м; 3 – 1200 м
 Рисунок 1.10 – Изменение плотности древесины каштана посевного в онтогенезе

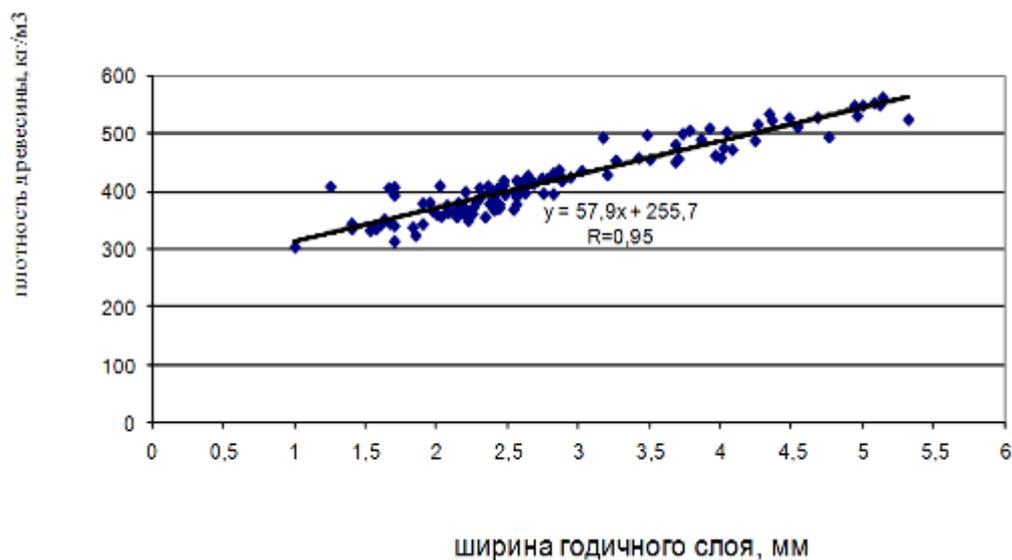


Рисунок 1.11 – Зависимость плотности древесины каштана посевного от ширины годичного слоя (высота произрастания 500 м над уровнем моря)

Таблица 1.4 – Мгновенный и длительный модули упругости березы, пластифицированной карбамидом

Влажность, %	Модули упругости, ГПа в направлениях					
	радиальном		тангенциальном		вдоль волокон	
	мгновенные	длительные	мгновенные	длительные	мгновенные	длительные
10	1,18	0,70	0,707	0,28	13,12	7,30
20	0,86	0,18	0,450	0,18	7,23	4,77
30	0,44	0,11	0,330	0,11	5,27	3,29

Анализируя приведенные данные можно сделать вывод, что модуль упругости (мгновенный, так как процесс фрезерования имеет малый характерный масштаб времени) вдоль волокон древесины приблизительно в 20 раз выше, чем в тангенциальном направлении и примерно в 10 раз выше, чем в радиальном. Такая существенная анизотропия механических свойств древесины требует обязательного учета ориентации древесины на поверхности, обрабатываемой фрезерованием, для достижения сопоставимой шероховатости вдоль сложной траектории движения фрезы.

Таким образом, как и большинство биологических объектов, древесина характеризуется ярко выраженной изменчивостью. Ее физико-механические свойства существенно изменяются по высоте и сечению ствола. Отсюда следует, что при механической обработке древесины качество обработанной поверхности во многом будет определяться анизотропией строения и свойств. Постранственная неоднородность свойств может составлять от десятков процентов до десятков раз и поэтому должна обязательно учитываться управляющими программами станков с ЧПУ при разработке алгоритма обработки поверхности заготовки.

Поэтому целесообразно в процессе фрезерования изменять технологические параметры в зависимости от локальных свойств обрабатываемой поверхности.

1.5 Цель и задачи исследования

На основе анализа литературных данных можно сделать вывод, что в настоящее время актуальна разработка технологии фрезерования, учитывающей структуру поверхности и управляющей технологическими параметрами в зависимости от локальной структуры в области обработки. Технология адаптивного фрезерования может повысить производительность процесса и улучшить качество поверхности за счет учета локальных особенностей структуры.

В соответствии с этим сформулирована **цель работы**: повышение производительности и качества декоративного фрезерования древесных элементов мебели путем разработки технологии адаптивного фрезерования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать физико-математическую модель процесса фрезерования древесины, учитывающей структуру поверхности.
2. Установить закономерности влияния макроструктуры древесины и технологических параметров процесса фрезерования на качество обрабатываемой поверхности.
3. Разработать методику оптического распознавания структуры поверхности древесины вдоль траектории движения фрезы.
4. Разработать технологию адаптивного декоративного фрезерования поверхности древесины и рекомендации по ее применению в деревообрабатывающей промышленности.

1.6 Выводы

1. Изучены особенности и проблемные задачи процесса фрезерования декоративных элементов мебели на оборудовании с ЧПУ. При производстве декоративных элементов мебели необходимо учитывать их конфигурацию, выбор режущего инструмента, параметров и режимов резания рабочих органов станка. При программировании перемещения инструмента необходимо обеспечивать управление по трем координатам при обработке пространственного сложного элемента декора.

2. При декоративном фрезеровании древесины технологические параметры целесообразно изменять в соответствии с локальной структурой, локальными особенностями перемещения фрезы, формой фрезы.

3. При фрезерной обработке древесины механические свойства поверхности существенно не постоянны, и изменение локальных условий фрезерования может составлять от десятков процентов до десятков раз. Поэтому целесообразно в процессе фрезерования изменять технологические параметры в зависимости от локальных свойств обрабатываемой поверхности.

4. На основе анализа современных технологий декоративного фрезерования древесины принято решение о необходимости совершенствования технологии и сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ С УЧЕТОМ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ

Теоретическое исследование в настоящей работе проводилось для решения следующих задач:

- разработать физико-математическую модель процесса фрезерования древесины с учетом ее структуры, обладающую высокими универсальностью, пространственным разрешением, адекватностью;

- исследовать влияние технологических параметров процесса фрезерования (частота вращения фрезы и скорость подачи) на шероховатость поверхности после фрезерования и сформулировать рекомендации по выбору рациональных технологических параметров.

- исследовать влияние параметров структуры годичных слоев на шероховатость поверхности после фрезерования и сформулировать рекомендации по выбору технологических параметров в зависимости от структуры обрабатываемой поверхности.

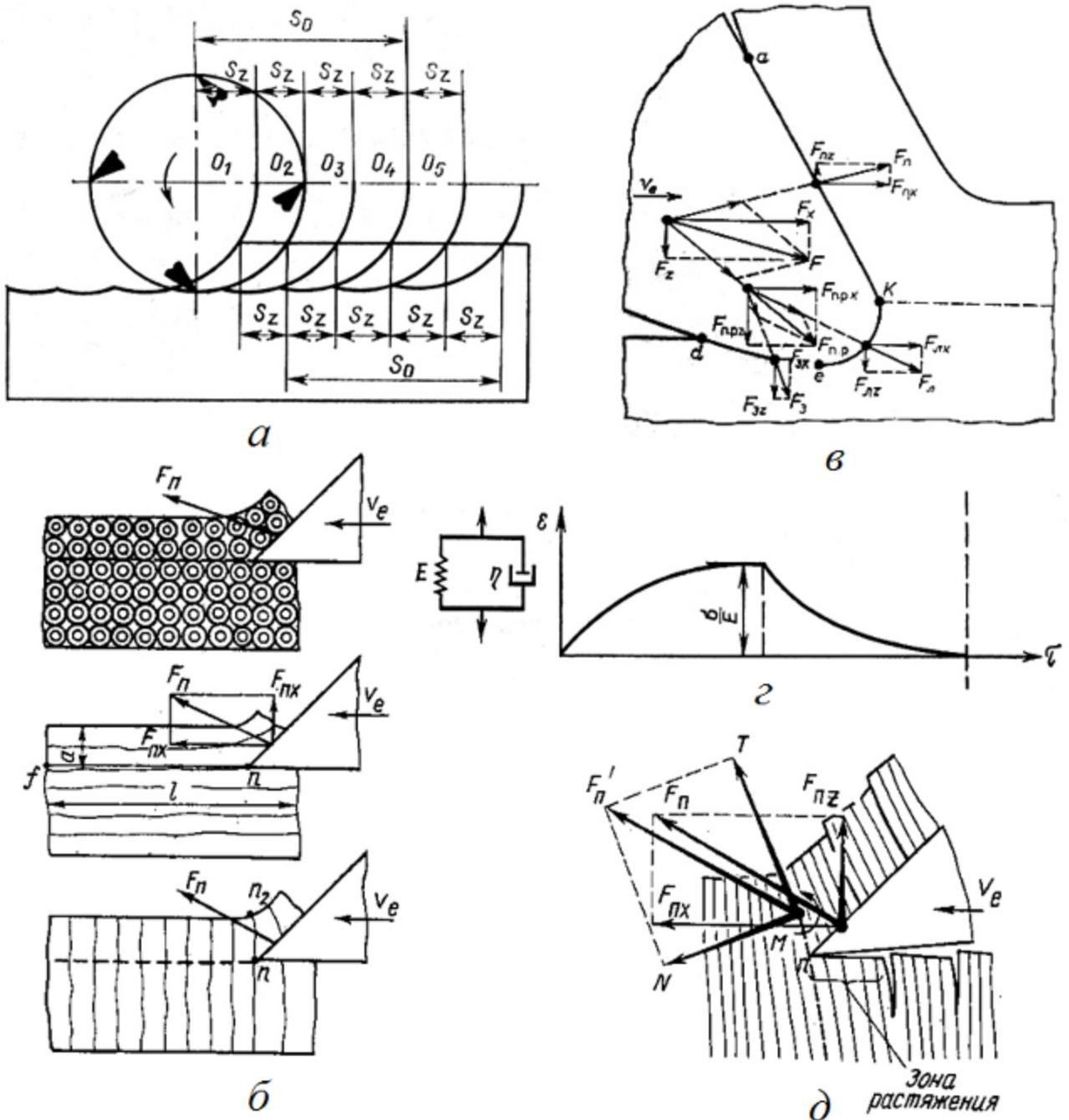
- оценить возможность использования разработанной модели в режиме реального времени в рамках алгоритма адаптивного управления скоростью подачи фрезы в зависимости от структуры обрабатываемой поверхности.

Теоретическое исследование проводилось в два этапа: на первом этапе была разработана физико-математическая модель процесса фрезерования с учетом структуры древесины, на втором этапе – с помощью модели изучено влияние технологических параметров и параметров структуры годичных слоев на производительность и качество фрезерования.

2.1 Математическая модель процесса фрезерования древесины с заданной структурой годичных слоев

К настоящему времени процессы резания древесины и, в частности, фрезерования, в той или иной степени изучены с различных позиций (рисунок 2.1) [22, 30,

45, 85]. В то же время существующие модели имеют целый ряд недостатков:



а – для определения рельефа поверхности после фрезерования; б – учитывающая направление волокон древесины; в – для расчета сил, действующих на лезвие и древесину, г – реологическая; д – стружкообразования

Рисунок 2.1 – Существующие модели фрезерования (в общем случае - резания) древесины, сфокусированные на различных явлениях и масштабах [45]

- сфокусированы только на отдельном "узком" аспекте процесса резания (например, только на силовом воздействии на лезвие, или только на стружкообразовании и т.п.);

- требуют ручных расчетов: ручного составления расчетных схем для древесины с заданной ориентацией волокон;

- фрагментация древесины (образование стружек, расслоение и т.п.) рассматривается в модели только качественно, но не количественно;

- модели имеют низкую пространственную детализацию, например, считаются постоянными угол ориентации волокон и другие свойства древесины, тогда как при реальном фрезеровании они изменяется в широких пределах вдоль траектории фрезерования;

- каждая из отдельных моделей имеет множество собственных допущений, существенно снижающих адекватность модели. Например, в модели формирования поверхности (рисунок 2.1, а) учитывается только геометрия, но не учитываются механика и анизотропия свойств древесины; в реологической модели (рисунок 2.1 б) описывается только деформирование древесины, но не фрагментация, и тем более не участвует структура древесины, и т.д.

Поэтому в настоящей работе была поставлена задача разработать модель, обладающую высокими универсальностью, адекватностью и пространственной детализацией. Модель должна одновременно описывать и силовое взаимодействие фрезы с древесиной, и учитывать структуру древесины и ее изменение вдоль линии фрезерования, и описывать деформацию и фрагментацию древесины, и позволять определить рельеф и шероховатость обработанной поверхности, а также позволять определить тип и форму стружек и траектории их движения [46].

Несмотря на чрезвычайную сложность поставленной задачи, использование методов моделирования, ориентированных на высокопроизводительную вычислительную технику позволило решить задачу в полной мере [46, 53, 54].

Для разработки модели фрезерования древесины выбран метод динамики частиц, как наиболее адекватный математический метод описания фрагменти-

руемых сред [1–3, 5, 75]. Ранее этот метод уже применялся в ФГБОУ ВПО "ВГЛТА" для моделирования процесса фрезерования древесноволокнистых плит средней плотности (материала с изотропными механическими свойствами) и показал высокую эффективность [36, 37]. В рамках этого метода древесина, в двумерном приближении, представляется совокупностью большого числа (порядка 10 000) элементов круглой формы, взаимодействующих между собой и с рабочими поверхностями фрезы по законам классической механики [31, 43, 44, 88, 98] (рисунок 2.2). В элементы закладываются основные механические свойства древесины: плотность, модуль упругости, коэффициент вязкого трения, прочность. Такая модель позволяет воспроизвести основные процессы, происходящие при обработке древесины: упруго-вязкую деформацию, фрагментацию, пластическую деформацию. Для воспроизведения в модели микроструктуры древесины заданной породы и заданной ориентации на сетку элементов накладывается изображение структуры древесины и локально корректируются перечисленные выше свойства элементов, в частности, в соответствии с попаданием в различные области годовичных колец.

Рабочие поверхности фрезы, движущейся по заданному закону в пространстве, оказывают силовое воздействие на контактирующие с фрезой элементы, вследствие чего происходит постепенное изменение конфигурации системы элементов, имитирующее отделение стружек.

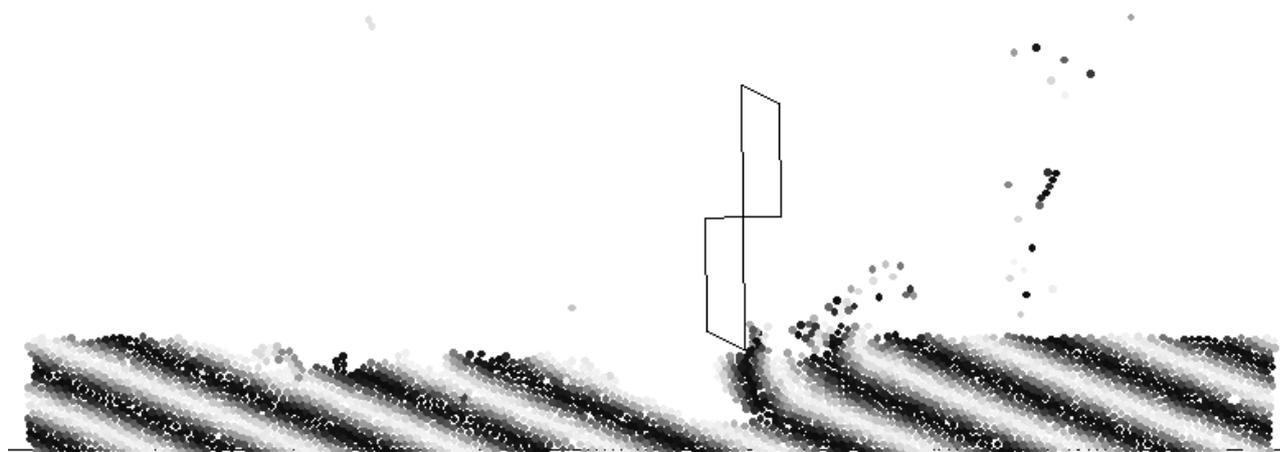


Рисунок 2.2 – Представление в модели процесса фрезерования древесины

Предлагаемая имитационная модель позволяет задавать различные технологические параметры процесса фрезерования (скорость подачи, частоту вращения, глубину обработки) и оценить их влияние, с учетом заданной структуры поверхности древесины, на показатели качества обработки, в частности шероховатость обработанной поверхности.

Предлагаемая модель может быть как встроена в систему управления фрезерным станком для адаптивного фрезерования, так и может использоваться только на этапах подготовки рекомендаций по повышению производительности фрезерования анизотропных поверхностей [72].

Состояние каждого элемента-круга i определяется четырьмя переменными: декартовыми координатами его центра (x_i, y_i) и двумя составляющими скорости (v_{xi}, v_{yi}) .

Взаимодействие элементов между собой носит вязкоупругий характер, что позволяет адекватно учитывать некоторую упругость материала. Элементы материала первоначально считаются связанными между собой, и при удалении двух элементов друг от друга на определенное расстояние (например, при резании ножом фрезы) происходит отрыв – вязкоупругое взаимодействие отключается. Это решение позволяет адекватно учесть в модели способность материала к разделению на фрагменты (стружки).

Расчет сил, действующих на элементы производится следующим образом. Некоторый элемент i испытывает силовое воздействие со стороны каждого из окружающих его элементов j :

$$F_i = \sum_{j=1}^{N_{\text{Э}}} (F_{ij}^Y + F_{ij}^B), \quad (2.1)$$

где F_{ij}^Y и F_{ij}^B – силы упругого и вязкого взаимодействия элементов i и j ;

$N_{\text{Э}}$ – общее количество элементов в модели материала.

При расчете сил для каждой пары элементов предварительно вычисляется расстояние r_{ij} между их центрами $S_i(x_i, y_i)$ и $S_j(x_j, y_j)$ (рисунок 2.3):

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}. \quad (2.2)$$

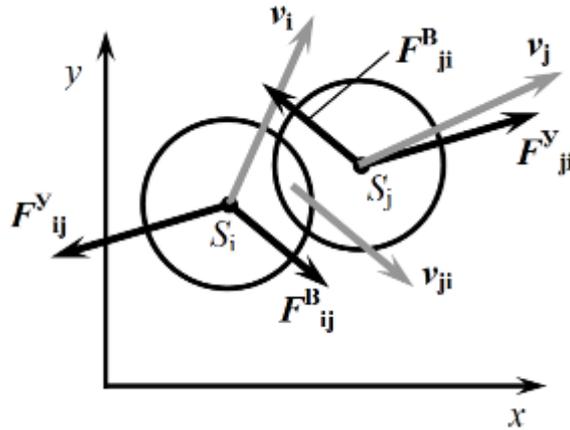


Рисунок 2.3 – Вязкоупругое взаимодействие двух частиц материала

В зависимости от того, связаны или не связаны элементы, расчет силы взаимодействия проводится по одной из двух формул (рисунок 2.4):

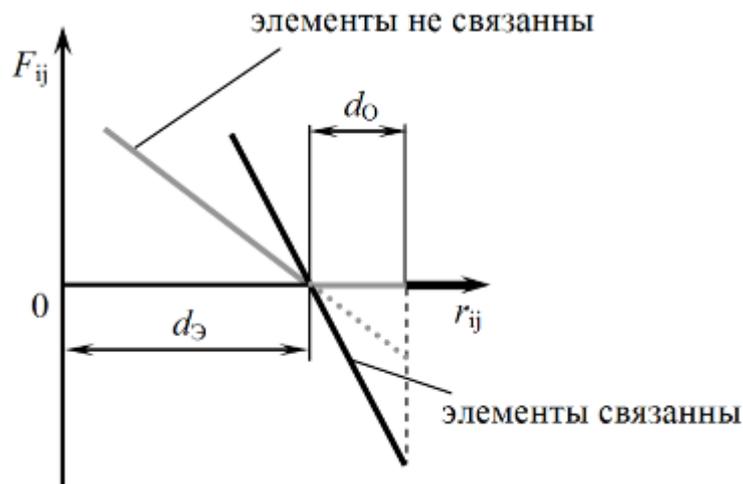


Рисунок 2.4 – Зависимость силы взаимодействия двух элементов i и j от расстояния между ними

1) Если элементы i и j не связаны, то

$$F_{xij}^v = \begin{cases} c_0(d_э - r_{ij}) \frac{(x_i - x_j)}{r_{ij}}, & \text{если } r_{ij} < d_э; \\ 0, & \text{если } r_{ij} \geq d_э; \end{cases} \quad (2.3)$$

$$F_{yij}^y = \begin{cases} c_o(d_{\text{э}} - r_{ij}) \frac{(y_i - y_j)}{r_{ij}}, & \text{если } r_{ij} < d_{\text{э}}; \\ 0, & \text{если } r_{ij} \geq d_{\text{э}}; \end{cases}$$

2) Если элементы i и j связаны, то

$$F_{xij}^y = \begin{cases} c_c(d_{\text{э}} - r_{ij}) \frac{(x_i - x_j)}{r_{ij}}, & \text{если } r_{ij} < d_{\text{э}} + d_c; \\ 0, & \text{если } r_{ij} \geq d_{\text{э}} + d_o; \end{cases} \quad (2.4)$$

$$F_{yij}^y = \begin{cases} c_c(d_{\text{э}} - r_{ij}) \frac{(y_i - y_j)}{r_{ij}}, & \text{если } r_{ij} < d_{\text{э}} + d_c; \\ 0, & \text{если } r_{ij} \geq d_{\text{э}} + d_o; \end{cases}$$

Здесь F_{xij}^y и F_{yij}^y – декартовы составляющие силы F_{ij}^y ;

c_o и c_c – коэффициенты жесткости упругого взаимодействия элементов, соответствующие случаям отсутствия и наличия связи между элементами;

d_o – расстояние отрыва (приращение расстояния между элементами, которое переводит элементы из состояния "связанны" в состояние "не связаны");

Для расчета F_{ij}^B выбрана общепринятая прямо-пропорциональная зависимость вязкой силы от скорости движущегося в среде тела, при этом введен дополнительный коэффициент $(r_{ij} - (d_{\text{э}} + d_o))$, характеризующий взаимное проникновение элементов друг в друга.

$$F_{xij}^B = k_m (r_{ij} - (d_{\text{э}} + d_o))(v_{xi} - v_{xj}); \quad (2.5)$$

$$F_{yij}^B = k_m (r_{ij} - (d_{\text{э}} + d_o))(v_{yi} - v_{yj});$$

где v_{xi} , v_{yi} и v_{xj} , v_{yj} – декартовы составляющие скоростей i -го и j -го элемента;

k_m – коэффициент демпфирования.

Вследствие анизотропии древесины элементы могут иметь различные значения параметров c_{oi} , c_{ci} , d_{oi} , d_{ci} , k_{ti} . Поэтому для каждой пары (i, j) элементов предварительно рассчитывается усредненный параметр взаимодействия.

В соответствии со вторым законом Ньютона запишем уравнения движе-

ния i -го элемента.

$$\begin{cases} m_{\mathcal{E}} \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^{N_{\mathcal{E}}} (F_{xij}^Y + F_{xij}^B) + c_{\mathcal{E}-\mathcal{L}} \cdot r_{\text{вн}i} \cdot s_{xi} + k_v (v_{xi} - v); \\ m_{\mathcal{E}} \frac{d^2 y_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^{N_{\mathcal{E}}} (F_{yij}^Y + F_{yij}^B) - m_{\mathcal{E}} g + c_{\mathcal{E}-\Phi} \cdot r_{\text{вн}i} \cdot s_{yi} + k_v v_{yi}, \end{cases} \quad (2.6)$$

где $m_{\mathcal{E}}$ – масса элемента;

t – время;

g – ускорение свободного падения;

$c_{\mathcal{E}-\Phi}$ и k_v – коэффициенты жесткости и вязкости вязкоупругого взаимодействия i -го элемента с фрезой;

$r_{\text{вн}i}$ – расстояние взаимного внедрения i -го элемента и фрезы;

s_{xi} и s_{yi} – декартовы составляющие вектора единичной длины, указывающего направление действия силы на i -й элемент со стороны фрезы;

v_{xi} и v_{yi} – декартовы составляющие вектора скорости i -го элемента;

v – скорость движения фрезы вдоль поверхности материала.

На основе численного решения уравнений данного вида для всех $N_{\mathcal{E}}$ элементов рассчитываются траектории движения удаляемых элементов, позиции элементов после прохода фрезы и, затем, показатели качества процесса фрезерования.

Необходимо отметить, что вращение элементов-кругов вокруг их центров в модели не учитывается, при этом практически не вносится погрешность, так как элементы образуют более крупные элементы материала (волокна, стружки). При движении таких крупных фрагментов учет их вращения просиходит автоматически – движением элементов друг относительно друга.

В ходе компьютерного эксперимента элементы могут двигаться внутри прямоугольника размерами $L_X \times L_Y$. В начале эксперимента круги образуют случайную плотную упаковку. Движущаяся вдоль направления OX и вращающаяся против часовой стрелки фреза, взаимодействуя с элементами материала,

вынуждает их двигаться по определенным траекториям, при этом за ножом образуется участок обработанной поверхности с определенной шероховатостью (рисунок 2.1).

В ходе компьютерного эксперимента какой-либо элемент может выйти за пределы прямоугольника, то есть выполнится одно из условий: $x_i < 0$, $x_i > L_x$, $y_i < 0$, $y_i > L_y$. В этом случае элемент возвращается в прямоугольник путем зеркального отражения от соответствующей стенки. Так например, если выполнилось условие $x_i > L_x$, координате x_i элемента присваивается значение $x_i = L_x - (x_i - L_x)$, а скорость элемента в направлении OX меняет знак: $v_{xi} = -v_{xi}$. При отражении элемента от стенки также производится незначительное гашение его энергии по адаптированным формулам (2.5).

С уменьшением диаметра элементов $d_{\text{Э}}$ модель материала становится более адекватной. В то же время количество элементов $N_{\text{Э}}$, необходимое для представления заданной площади сечения S , резко возрастает по квадратичному закону с уменьшением $d_{\text{Э}}$:

$$N_{\text{Э}} = \frac{S}{k_y \cdot \pi \cdot d_{\text{Э}}^2}, \quad (2.7)$$

где k_y – коэффициент упаковки элементов-кругов.

При увеличении же количества элементов увеличивается количество уравнений, описывающих материал и, соответственно, время расчета на ЭВМ. Даже уменьшение диаметра круга вдвое приводит к увеличению длительности расчета в четыре раза. Поэтому, если ориентироваться на вычислительные возможности современных ЭВМ, оптимальный диаметр элементов, позволяющий с достаточной точностью описать образец материала с линейными размерами порядка 1–3 мм, но одновременно не приводящий к длительным компьютерным расчетам, составляет порядка 10 мкм. При этом общее количество элементов в модели составляет 8000.

Перед проведением компьютерного эксперимента производится специ-

альная процедура подготовки плотноупакованного объема материала. Сначала необходимое количество элементов распределяется случайным образом по всему объему прямоугольника. Затем производится интегрирование уравнений движения (2.6) в течении промежутка времени 0,1 с. При этом под действием сил возникающих между элементами, они начинают формировать в нижней части прямоугольника слой материала. Для создания более плотной упаковки в промежуток времени от 0,1 до 0,2 с производится "встряска" материала: координатам (x_i, y_i) всех элементов на каждом шаге интегрирования сообщают дополнительные случайные смещения. В процессе процедуры подготовки материала скорости элементов, первоначально возникшие в результате взаимодействия между собой, постепенно гасят, чтобы к концу процедуры элементы образовали неподвижный плотноупакованный объем материал. Впоследствии, в ходе компьютерного эксперимента, элементы приобретают скорости за счет взаимодействия с ножом фрезы.

Для того, чтобы воспроизвести в модели первоначальную прочную связность элементов друг с другом и последующий их отрыв при взаимодействии с фрезой, используется первоначальная "склейка" элементов и последующая "расклейка", в случае их отдаления друг от друга. После окончания процедуры подготовки модельной древесины производится "склейка" элементов, находящихся на расстояниях менее $d_{\Sigma} + d_0$: занесение в специальный массив информации, о том, что данная пара элементов является связанной. Связанные и не связанные элементы взаимодействуют по-разному (см. формулы 2.3–2.4). В процессе интегрирования уравнений движения элементов производится проверка: если расстояние между какой-либо парой связанных элементов становится более $d_{\Sigma} + d_0$ производится корректировка массива связности: элементы считаются не связанными.

Для того, чтобы учесть структуру древесины перед началом компьютерного эксперимента производится назначение физических свойств элементам с учетом периодичности. Так, например, коэффициент жесткости назначается элементам следующим образом.

$$c_{O_i} = c_{O_{cp}} \left(0,5 + 1,0 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \left((x_i \sin \varphi_{гк} + y_i \cos \varphi_{гк}) \frac{k_{гк}}{d_{гк}} \right) \right) \right), \quad (2.8)$$

где $c_{O_{cp}}$ – среднее значение коэффициента жесткости; $\varphi_{гк}$ – угол ориентации годовичных колец к направлению подачи фрезы; $d_{гк}$ – расстояние между годовичными кольцами; $k_{гк}$ – нормировочный коэффициент; коэффициенты 1/2 необходимы для того, чтобы синусоида осциллировала в пределах от 0 до 1; коэффициенты 0,5 и 1,0 задают пределы изменений коэффициента жесткости (в данном случае от 0,5 до 1,5 от среднего значения $c_{O_{cp}}$). Аналогичным образом элементам производится назначение других параметров в зависимости от положения элемента.

По общепринятой классификации моделей, предлагаемая модель является алгоритмической, но не аналитической. Это означает, что выходные характеристики модели рассчитываются по входным не путем аналитических преобразований (это в принципе не возможно для моделируемого процесса), а с помощью пространственной и временной дискретизации, и соответствующего алгоритма расчета.

Расчет по приведенным выше формулам является довольно громоздким и включает в себя три цикла, вложенных один в другой: по номеру компьютерного эксперимента, по номеру временного шага и по номеру элемента.

2.1.2 Взаимодействие фрезы с древесиной

В модели считается, что элементы материала взаимодействуют с фрезой вязкоупругими силами, что отражено последними двумя слагаемыми в формулах (2.6). Опишем подробно, как рассчитываются расстояние $r_{внi}$ взаимного внедрения i -го элемента и фрезы, а также декартовы составляющие s_{xi} и s_{yi} вектора, указывающего направление действия силы на i -й элемент.



геометрические параметры фрезы;

2.5 – Представление двухперьевой фрезы в модели

Большинство расчетов в данной работе проведены для двухперьевой фрезы (рисунок 2.5). На каждом шаге интегрирования τ прежде всего производится размещение в пространстве базовых точек фрезы P_0, P_1, \dots, P_6 (рисунок 2.4) в зависимости от текущего расположения центра фрезы (x_ϕ, y_ϕ) и текущего угла ее поворота:

в целом повторяет изменения общей ширины годичного слоя. Однако колебания ширины поздней зоны имеют меньшие амплитуды, чем для зависимости общей ширины годичного слоя. Ширина поздней зоны слабо зависит от условий внешней среды и является генотипически обусловленным признаком.

$$s_o = s_z \cdot z; \quad s_m = s_o \cdot n = s_z \cdot z \cdot n. \quad (2.9)$$

Таким образом, решена задача разработки технологии декоративного фрезерования мебельных щитов, позволяющая повысить производительность и улучшить изначальное качество обрабатываемых поверхностей.

контакт элемента и фрезы длится несколько шагов интегрирования, и элемент успевает оттолкнуться от рабочих поверхностей фрезы, не успев проникнув внутрь.

Наиболее оптимальным, с точки зрения снижения шероховатости, является вариант использования переменной скорости подачи в зависимости от направления волокон (правый квадрат). В этом случае шероховатость оказывается минимальной, в частности, при обработке сосны на 18–35 % меньше чем для случаев обработки с постоянной скоростью подачи.

$$v_{под} = \frac{v_{под}^0 + v_{под}^{90}}{2} + \frac{v_{под}^0 - v_{под}^{90}}{2} \cos 2(\alpha - \beta), \quad (2.10)$$

Разработана стратегия и план экспериментального исследования адаптивной технологии фрезерования древесины и МДФ. Определен набор варьируемых параметров, разработан план лабораторного экспериментального исследования, сформулированы критерии экспериментального исследования.

Во втором варианте необходимо выбрать готовую программу изготовления декоративных элементов мебели из базы данных программы «Декор». Данная программа может редактироваться с учетом пожелания заказчика: выбор орнамента, украшений; изменение отделки и т.д [35, 38, 55]. После формирования кода для станка с ЧПУ сигналы поступают в устройство сравнения, которое сравнивает информацию от датчиков координат по трем направлениям.

Знание, что элементы находятся вне многоугольников, позволяет упростить проверку их касания ребер и за счет этого получить более простые аналитические выражения для вычисления, сил, действующих на элементы.

Между элементом и ребром фрезы возникает силовое взаимодействие, если центр (x_i, y_i) круга-элемента попадает в область, отстоящую от фрезы ТС на расстоянии $0,5 d_э$ (рисунок 2.5), и состоящую, для нижней половины фрезы,

из четырех прямоугольников (области *I, III, V, VII* на рисунке), и трех секторов (области *II, IV, VI* на рисунке).

Существующие технологии фрезерования декоративных элементов не учитывают локальные особенности макроструктуры древесины, поэтому не позволяют достигнуть высокой производительности и качества обработки поверхности, особенно при фрезеровании высокохудожественных изделий, мелкосерийном или позаказном производстве, для низкосортной древесины.

Разработана физико-математическая модель фрезерования древесины, учитывающая структуру поверхностного слоя, позволяющая подобрать рациональные параметры процесса фрезерования, обеспечивающие высокие производительность и качество обработки поверхности.

Установлено, что при углах ориентации годовичных слоев к направлению подачи фрезы $0...45^\circ$ образуются различные дефекты поверхности, сопровождающиеся высокой шероховатостью и сколами.

При декоративном фрезеровании древесины технологические параметры целесообразно изменять в соответствии с локальной структурой, локальными особенностями перемещения фрезы, формой фрезы.

$$A_1x + B_1y + C_1 = 0, \quad (2.11)$$

$$\text{где } A_1 = y_{P1} - y_{P0}; \quad B_1 = -(x_{P1} - x_{P0}); \quad C_1 = (x_{P1} - x_{P0})y_{P0} - (y_{P1} - y_{P0})x_{P0}.$$

Уравнение прямой *SD* составляется по известным координатам точки, через которую проходит прямая (x_s, y_s) , и нормальному вектору *N* к прямой P_0P_1 , в качестве компонент которого можно использовать коэффициенты A_1 и B_1 уравнения прямой P_0P_1 в канонической форме $N = \{A_1, B_1\}$:

их частоты (или кратных частот) с частотой вращения фрезы проявляются резонансные явления, которые существенно повышают шероховатость поверхности и в отдельных случаях приводят к ее сильному разрушению

$$A_2x + B_2y + C_2 = 0, \quad (2.12)$$

где $A_1 = -(x_{P1} - x_{P0})$; $B_1 = -(y_{P1} - y_{P0})$; $C_1 = (x_{P1} - x_{P0})x_S + (y_{P1} - y_{P0})y_S$.

Шероховатость R_a является показателем качества обработки поверхности. Она определяется как среднее отклонение высоты поверхности от среднего уровня.

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 H_{imax} - \sum_{i=1}^5 H_{imin}}{5} \quad (2.13)$$

$$v_{под} = \frac{v_{под}^0 + v_{под}^{90}}{2} + \frac{v_{под}^0 - v_{под}^{90}}{2} \cos 2(\alpha - \beta), \quad (2.14)$$

$$N_{\mathcal{O}} = \frac{S}{k_v \cdot \pi \cdot d_{\mathcal{O}}^2} \quad (2.15)$$

, полученное на основе большого количества измерений N_n ($N_n = 1000$) при различных координатах x , выбираемых случайным образом от $x_1 = 15$ мм до $x_2 = 45$ мм (начало и конец обработанного участка):

$$P = b_0 + b_1 v_{под} + b_2 \omega + b_3 f + b_{11} v_{под}^2 + b_{22} \omega^2 + b_{33} f \quad (2.16)$$

Шероховатость R_a является показателем качества обработки поверхности. Она определяется как среднее отклонение высоты поверхности от среднего уровня.

$$R = a_0 + a_1 v_{\text{под}} + a_2 \omega + a_3 f + a_{11} v_{\text{под}}^2 + a_{22} \omega^2 + a_{33} f^2 + a_{12} v_{\text{под}} \omega + a_{13} v_{\text{под}} f + a_{23} \omega f; \quad (2.17)$$

Разработана физико-математическая модель фрезерования древесины с заданной структурой приповерхностного слоя. Модель позволяет задавать различные технологические параметры процесса фрезерования (скорость подачи, частоту вращения, глубину обработки) и определить их влияние, с учетом заданной структуры поверхности древесины, на показатели качества обработки, в частности шероховатость обработанной поверхности.

Предлагаемая модель может быть как встроена в систему управления фрезерным станком для адаптивного фрезерования, так и может использоваться для подготовки рекомендаций по повышению производительности фрезерования анизотропных поверхностей.

$$v_{\text{под}}(\varphi) = \frac{v_{\text{под}}^0 + v_{\text{под}}^{90}}{2} + \frac{v_{\text{под}}^0 - v_{\text{под}}^{90}}{2} \cos 2\varphi, \quad (2.18)$$

показана траектория движения фрезы, при этом толщина линии пропорциональна рекомендуемой скорости подачи фрезы. Как видно из рисунка, целесообразно изменять в широких пределах скорость подачи фрезы в процессе обработки.

$$v_{\text{min}}=500=(-1); \quad v_{\text{max}}=2500=(+1); \quad v_{\text{cp}} = \frac{v_{\text{max}} + v_{\text{min}}}{2} = \frac{500 + 2500}{2} = 1500=(0); \quad (2.19)$$

. Предложено аналитическое выражение для определения оптимальной скорости подачи фрезы для произвольного угла между траекторией движения и направлением волокон. Получены коэффициенты выражения для древесины сосны, березы, дуба. Данное выражение может быть использовано в системах

адаптивного управления декоративным фрезерованием.

2.1.3 Расчет выходных характеристик

Основной выходной характеристикой, рассчитываемой в модели, является шероховатость поверхности R_a . Шероховатость R_a является показателем качества обработки поверхности. Она определяется как среднее отклонение высоты поверхности от среднего уровня, полученное на основе большого количества измерений N_u ($N_u = 1000$) при различных координатах x , выбираемых случайным образом от $x_1 = 15$ мм до $x_2 = 45$ мм (начало и конец обработанного участка):

$$R_a = \frac{|h_k - h_{cp}|}{N_u}; \quad h_{cp} = \frac{\sum_{k=1}^{N_u} h_k}{N_u}, \quad (2.20)$$

где h_k – высота поверхности при k -м измерении; h_{cp} – средний уровень поверхности. В дальнейшем приемлемой считается шероховатость менее $R_a = 20$ мкм.

2.1.4 Общая система уравнений

Таким образом, для того чтобы определить, как изменяется структура материала при прохождении фрезы необходимо проинтегрировать уравнения движения (2.6) с подстановкой в них сил, вычисляемых по формулам (2.3–2.4) в зависимости от связности пары взаимодействующих элементов, а также сил со стороны фрезы (2.17, 2.19). Поэтому математическая модель представляет собой систему большого количества дифференциальных уравнений второго порядка (уравнений движения), а также промежуточных алгебраических уравнений. Решение системы производится численно, методом Эйлера-Коши [39].

2.1.5 Начальные и граничные условия, допущения модели

Начальные условия. Начальные координаты элементов древесины определяются алгоритмом их начального размещения (см. выше). Начальные скорости механического движения элементов равны нулю:

$$v_{xi}^0 = 0, v_{zi}^0 = 0.$$

Граничные условия. Механическое движение элементов ограничено границами модельного пространства. Те элементы, которые выходят за границы модельного пространства, возвращаются в него. Так, например, если координата x_i элемента превысит длину модельного пространства L_x , производится коррекция координаты и скорости элемента:

$$\text{если } x_i > L_x, \text{ то } x_i = L_x; v_{xi} = -v_{xi}.$$

В модели приняты следующие допущения:

- в пределах одного элемента вещество считается сплошной средой;
- элементы движутся по законам классической динамики, механически взаимодействуя между собой и с поверхностями фрезы;
- элемент является однородным: объемная плотность и другие физические свойства одинакова в пределах всего элемента;
- механическое взаимодействие между элементами носит линейный вязкоупругий характер;
- механические свойства материала зависят только от пяти параметров элементов (диаметр, масса, коэффициенты жесткости, вязкости, ограничения взаимодействия);

2.1.6 Программная реализация модели

Разработанная математическая модель представляет собой систему из нескольких тысяч дифференциальных и алгебраических уравнений. Для удобства исследования системы уравнений составлена компьютерная программа "Программа для моделирования процесса фрезерования древесины с заданной структурой" на языке Object Pascal в интегрированной среде программирования

Borland Delphi 7.0 (рисунок 2.6). Получено свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015613968 от 01.04.2015 (Приложение А) [84].

Программа предназначена для моделирования процесса удаления фрезой верхнего слоя древесины в срезе с заданной структурой. Физические свойства конечных элементов древесины задаются в соответствии с конфигурацией годовичных колец. В тексте программы задаются основные физико-геометрические параметры древесины и технологические параметры процесса фрезерования. В процессе работы программа выводит на экран компьютера текущее изображение модельной древесины и фрезы, а также текущие значения основных характеристик процесса: мощности резания, давления под лезвием фрезы, эпюры сил на лезвии фрезы, шероховатости поверхности. Программа может быть полезна для оптимизации технологических параметров для декоративного фрезерования со сложной траекторией движения фрезы относительно годовичных колец среза.

Основные технические характеристики программы:

- количество элементов древесины от 3000 до 10000;
- ориентировочное время проведения одного компьютерного эксперимента около 5 мин (при тактовой частоте процессора 3 ГГц).

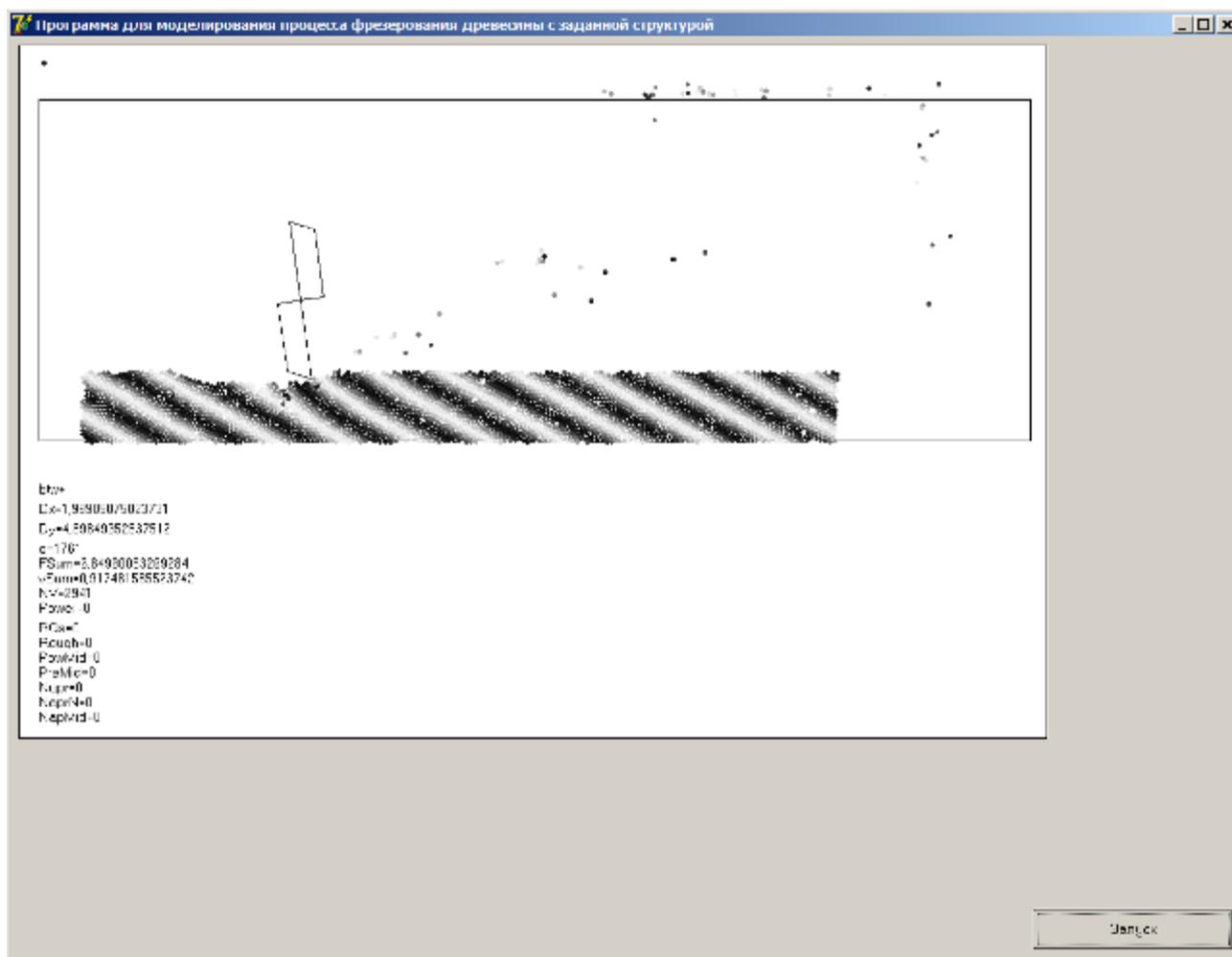


Рисунок 2.6 – Вывод результатов моделирования в "Программе для моделирования процесса фрезерования древесины с заданной структурой"

2.1.7 Особенности проведения компьютерного эксперимента

Дальнейшее теоретическое исследование основано на проведении определенного количества компьютерных экспериментов, в которых изменяется изучаемый параметр и производится анализ результатов моделирования. Отдельный компьютерный эксперимент заключался в следующем. Двухперьевая фреза диаметром 10 мм, с частотой вращения 15 000 об/мин. подавалась в горизонтальном направлении со скоростью 1000 мм/мин, с величиной заглубления 2 мм. Для большинства компьютерных экспериментов в качестве древесины выступала сосна с углом ориентации волокон древесины 45° к направлению движения фрезы и расстоянием между годичными кольцами 2 мм (рисунок 2.6).

После прохода фрезой расстояния 35 мм компьютерный эксперимент останавливался и производилось определение шероховатости поверхности R_a на контрольном участке длиной 30 мм. После проведения компьютерного эксперимента копия экрана сохранялась в отдельный файл для последующего сравнительного визуального анализа нарушений поверхности модельного образца древесины.

2.2 Исследование влияния макроструктуры древесины на качество поверхности пиломатериалов при фрезеровании

Разработанная модель предоставляет широкие возможности для теоретического исследования процесса фрезерования древесины различных пород и различной структуры, а также для выявления оптимальных технологических параметров процесса для заданной структуры поверхности древесины.

2.2.1 Угол ориентации волокон древесины к направлению подачи фрезы

В зависимости от ориентации волокон древесины по отношению к направлению подачи фрезы механика процесса фрезерования существенно различается. Для изучения влияния угла $\varphi_{ГК}$ проведена серия из девяти компьютерных экспериментов, в которых $\varphi_{ГК}$ изменяли от $0,0$ до $180,0^\circ$ с шагом $22,5^\circ$ (рисунок 2.7).

При проведении компьютерных экспериментов было обнаружено, что качество поверхности, формируемой после прохода фрезы, существенно зависит от угла между годичными кольцами и направлением движения фрезы. При малых углах $\varphi_{ГК}$ (от 0 до 45°) лезвие фрезы подрывает и отслаивает годичные кольца, что приводит к образованию глубоких и протяженных дефектов поверхности (рисунок 2.7, $\varphi_{ГК} = 0^\circ, 23^\circ$). Рассчитанное для этих случаев значение шероховатости поверхности оказывается существенно выше, чем для других углов: на зависимости $R_a(\varphi_{ГК})$ наблюдается ярко выраженный пик в диапазоне углов от 0 до 45° (рисунок 2.8). В остальном угловом диапазоне подрыва и от-

слоения годовых колец не происходит (рисунок 2.7, $\varphi_{гк} = 68^\circ \dots 180^\circ$), формируется достаточно ровная поверхность, с шероховатостью, не превышающей 100 мкм (рисунок 2.8).

Необходимо отметить, что случаи $\varphi_{гк} = 0^\circ$ и $\varphi_{гк} = 180^\circ$ идентичны с точки зрения ориентации слоев. Однако в первом случае на поверхности модельного образца древесины располагался плотный и прочный слой, который при взаимодействии с лезвием фрезы испытывал существенные нагрузки и хаотично разрушался. А во втором случае на поверхности модельного образца древесины располагался малоплотный и низкопрочный слой, который легко отделялся лезвием от нижнего, более плотного и прочного слоя, поэтому в результате формировалась значительно более ровная поверхность.

Результаты данной серии экспериментов позволяют сделать следующий вывод. С точки зрения повышения качества формируемой поверхности наиболее неблагоприятными углами ориентации годовых колец по отношению к направлению подачи фрезы являются углы $0 \dots 45^\circ$. При фрезеровании таких направлений в древесине желательно изменять технологические параметры процесса (скорость подачи, частота вращения фрезы).

2.2.2 Расстояние между годовыми кольцами

На одной и той же поверхности изделия из дерева расстояние между годовыми кольцами может сильно различаться в различных местах (ориентировочно от 0,2 до 20 мм). Для изучения того, как расстояние между годовыми кольцами $d_{гк}$ в локальной области влияет на качество фрезерования, проведена серия компьютерных экспериментов, в которой варьировали $d_{гк}$ на уровнях 1, 2, 4, 8 мм (рисунок 2.9).

При малом расстоянии между годовыми кольцами (рисунок 2.7, $d_{гк} = 1$ мм) древесина ведет себя как прочный и довольно однородный материал, поэтому взаимодействие с фрезой вызывает значительные напряжения в приповерхностном слое древесины и приводит к отщеплению отдельных фрагментов с формированием углублений.

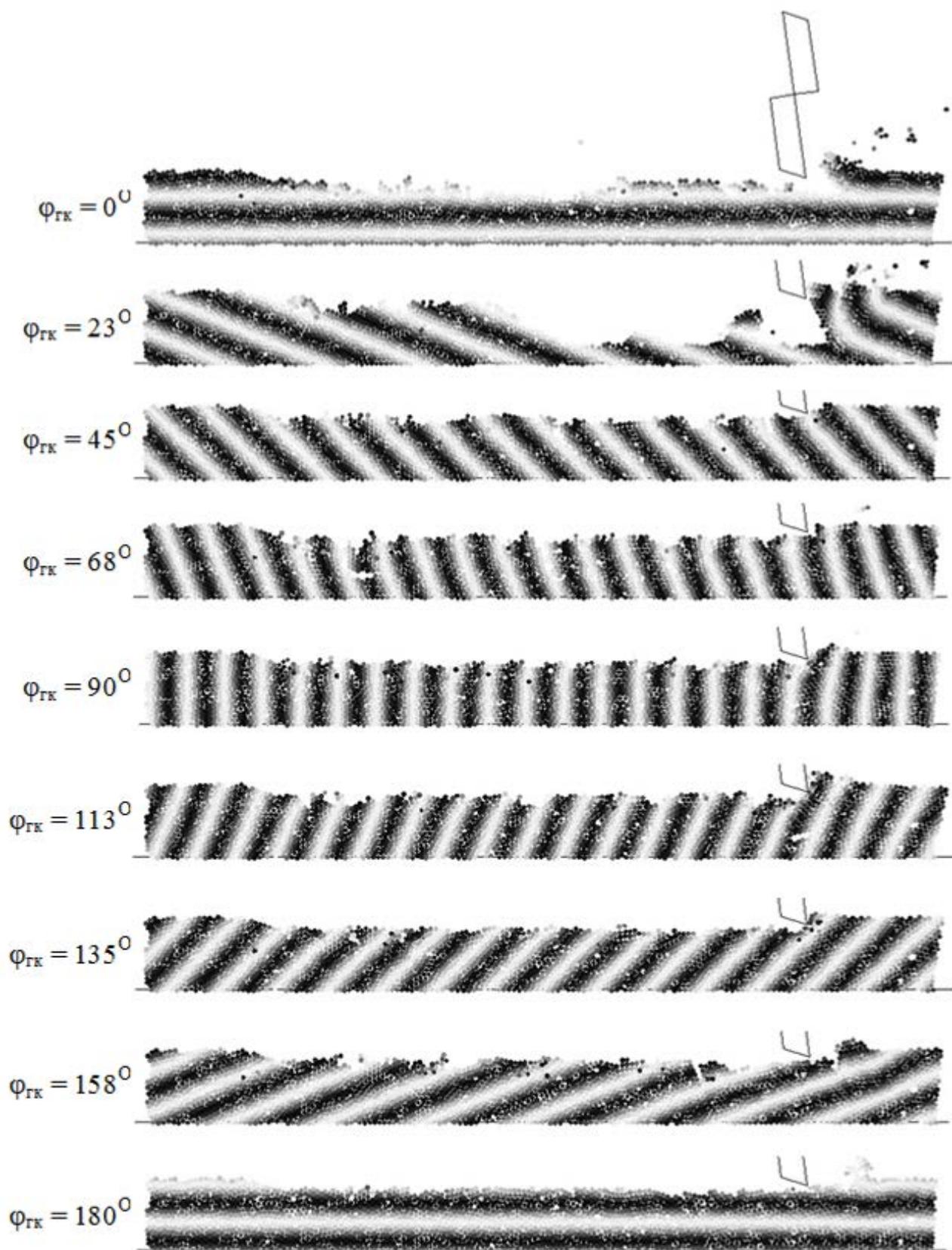


Рисунок 2.7 – Результаты фрезерования модельного образца древесины при различных углах $\varphi_{ГК}$ ориентации годичных колец древесины к направлению подачи фрезы

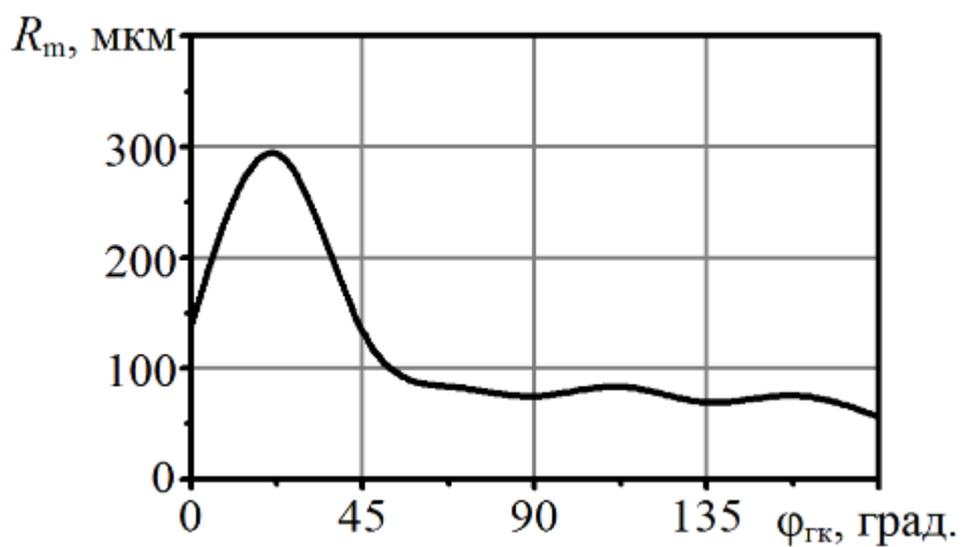


Рисунок 2.8 – Зависимость шероховатости поверхности после фрезерования R_a от угла ориентации годовичных колец $\phi_{ГК}$ к направлению подачи фрезы

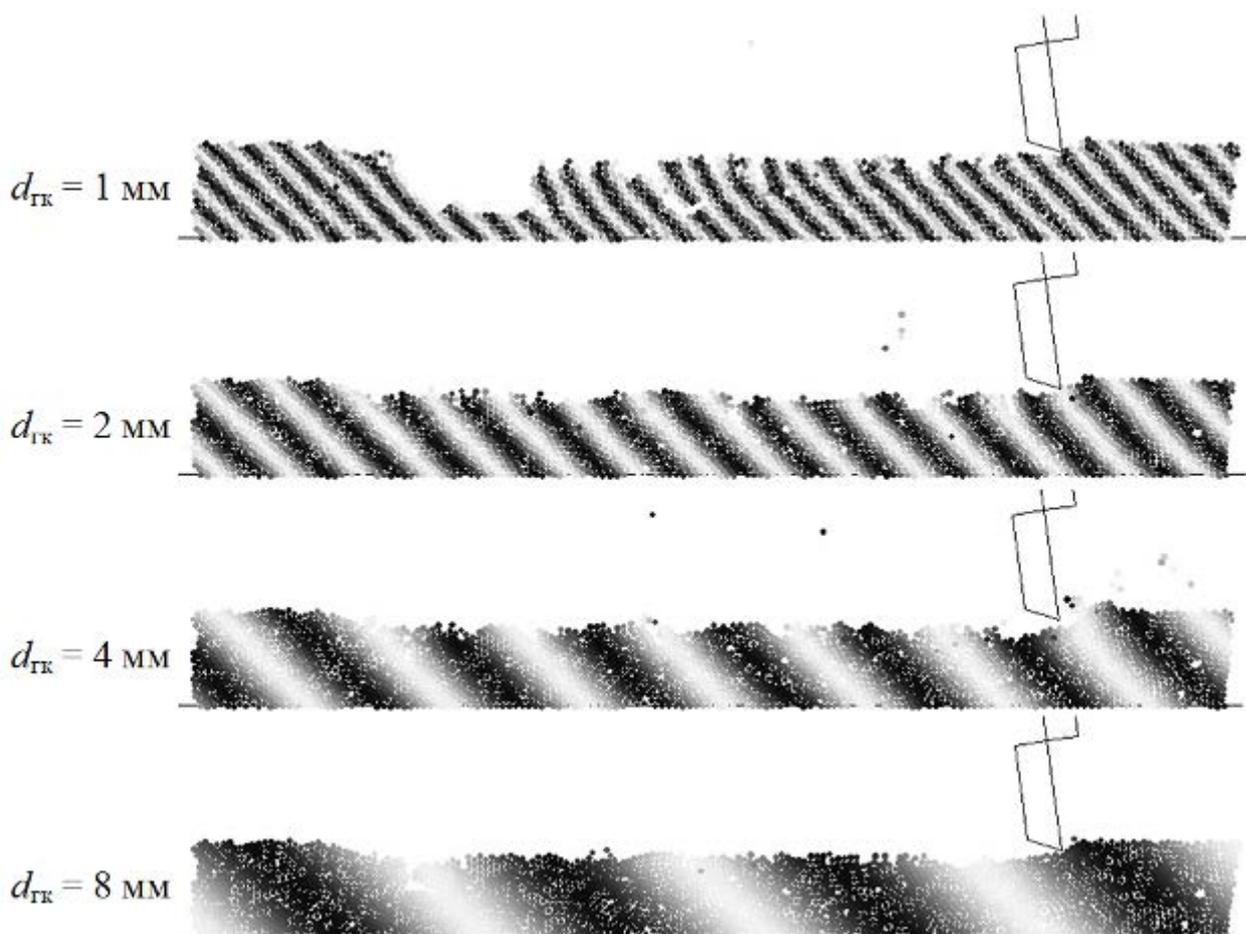


Рисунок 2.9– Результаты фрезерования древесины с различными расстояниями между годовичными кольцами $d_{ГК}$

На участках, где древесина не отщепляется (правая часть рисунка) шероховатость поверхности имеет достаточно низкое значение. Однако с учетом значительной доли углублений, общая шероховатость оказывается значительно выше, чем для случаев большего расстояния между годичными кольцами (рисунок 2.10). Для исключения образования углублений в локальных областях с малым расстоянием между годичными кольцами целесообразно снижать частоту вращения фрезы или уменьшать скорость подачи, чтобы уменьшить энергию, передаваемую древесине в области обработки.

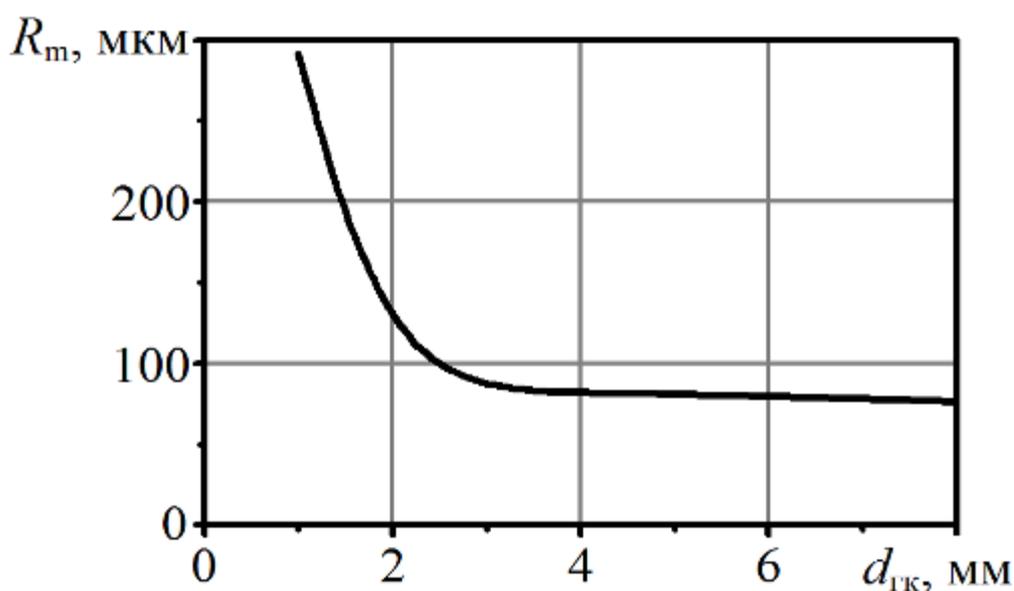


Рисунок 2.10 – Зависимость шероховатости поверхности после фрезерования R_a от расстояния между годичными кольцами $d_{ГК}$

При расстояниях между годичными кольцами более 1 мм нарушений поверхности не наблюдается (рисунок 2.9, $d_{ГК} = 2, 4, 8$ мм). При этом поверхность имеет пилообразную форму: периодичность поверхности наследует периодичность механических свойств годичных колец. При больших расстояниях $d_{ГК}$ шероховатость поверхности практически не зависит от $d_{ГК}$ и в данных режимах обработки не превышает 100 мкм.

Таким образом, в областях поверхности фрезеруемой древесины, в кото-

рых расстояние между годичными кольцами менее 1 мм, целесообразно снижение скорости подачи фрезы (либо частоты вращения), для уменьшения энергетического воздействия на древесину и исключения образования углублений. При расстоянии между годичными кольцами более 1 мм качество формируемой поверхности практически не зависит от расстояния между годичными кольцами.

2.3 Исследование влияния технологических параметров процесса фрезерования на качество поверхности

Изменение технологических параметров процесса фрезерования в зависимости от структуры локальной обрабатываемой области поверхности древесины можно добиться высокого качества обработки поверхности, приблизительно одинакового по всей поверхности. В данной работе изучено влияние скорости подачи фрезы $v_{\text{под}}$ и частоты ее вращения $f_{\text{ф}}$ на качество формируемой поверхности, а также сформулированы закономерности, которые будут использоваться в дальнейшем для обоснования необходимости и конкретных параметров адаптивного фрезерования.

2.3.1 Скорость подачи фрезы

Скорость подачи фрезы $v_{\text{под}}$ определяет общую энергетику механических процессов в области контакта фрезы с поверхностью, а также влияет на резонансные процессы в упругой системе фреза-древесина. С целью изучения влияния $v_{\text{под}}$ на качество обработки поверхности проведена серия компьютерных экспериментов, в которых $v_{\text{под}}$ варьировали на уровнях 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1250, 1500, 1750, 2000 мм/мин (рисунок 2.11)

Обнаружена сложная, немонотонная, зависимость особенностей процесса фрезерования и показателей качества поверхности от скорости подачи (рисунок 2.12). При малых скоростях подачи (ориентировочно до 600 мм/мин.) энергетическое воздействие фрезы на поверхность древесины довольно мало и практи-

чески полностью направлено на основную функцию – срезание верхнего слоя древесины (рисунок 2.11, $v_{\text{под}} = 500$ мм/мин.). В этом диапазоне $v_{\text{под}}$ шероховатость поверхности практически не зависит от $v_{\text{под}}$ и составляет менее 100 мкм (рисунок 2.15).

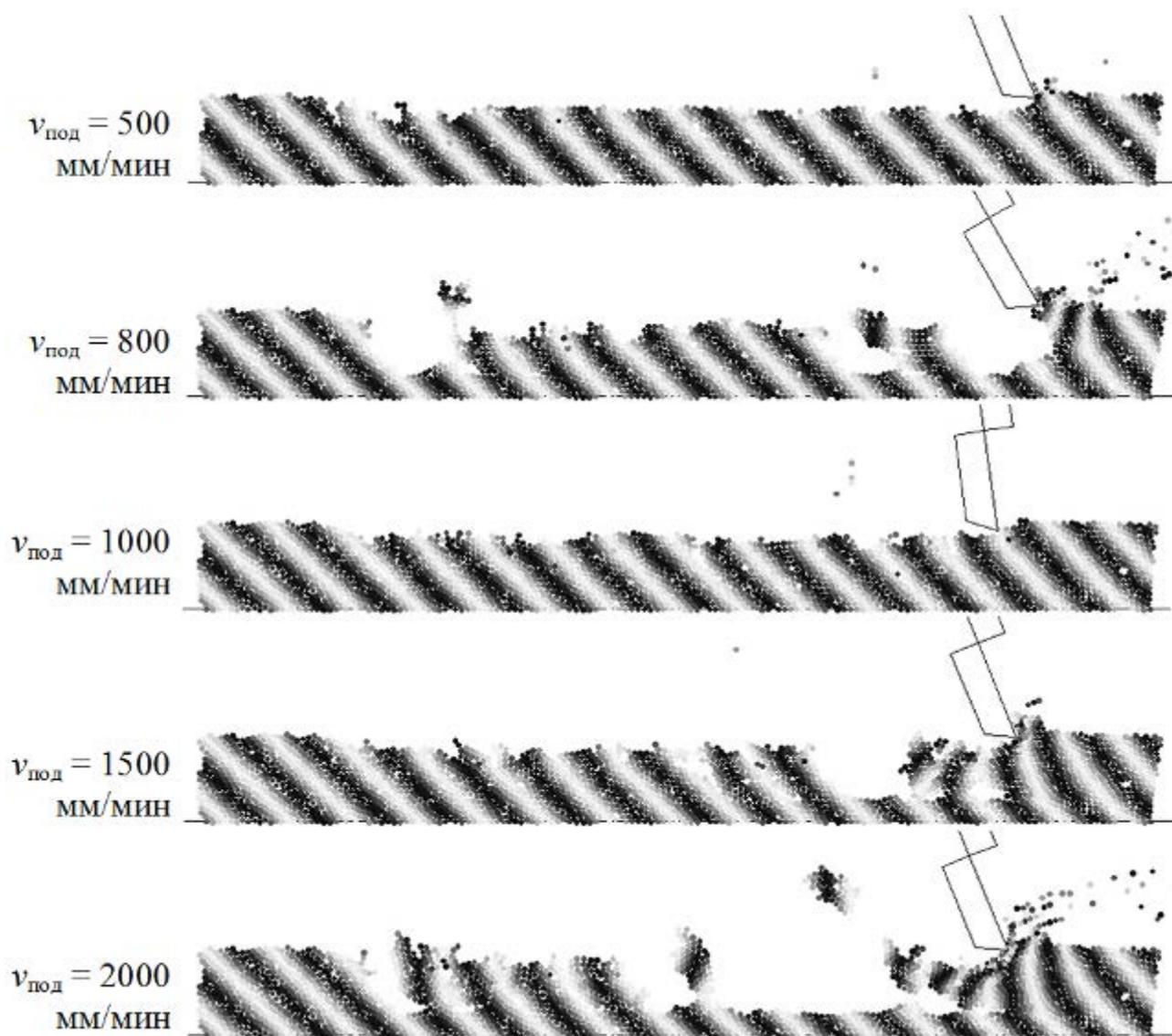


Рисунок 2.11 – Результаты фрезерования при различных скоростях подачи фрезы $v_{\text{под}}$

При скоростях подачи более 600 мм/мин поверхности передается значительная энергия от фрезы, что приводит не только к удалению фрагментов древесины, но и к динамизации значительной области древесины вблизи лезвия фрезы. Возникающие собственные колебания в упругой системе фреза-древесина ухудшают качество обработки поверхности, а в случае совпадения

их частоты (или кратных частот) с частотой вращения фрезы проявляются резонансные явления, которые существенно повышают шероховатость поверхности и в отдельных случаях приводят к ее сильному разрушению (рисунок 2.11, $v_{\text{под}} = 800, 1500$ мм/мин.)

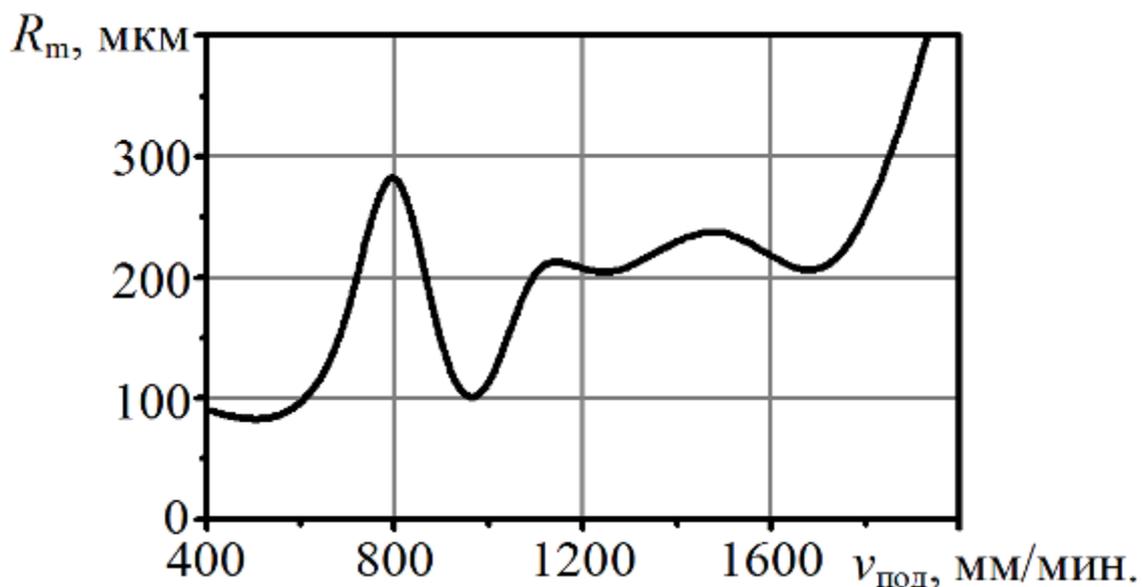


Рисунок 2.12 – Зависимость шероховатости поверхности после фрезерования R_a от скорости подачи фрезы $v_{\text{под}}$

Однако в области больших скоростей подачи может быть найден довольно широкий "антирезонансный" диапазон ($v_{\text{под}} = 900...1100$ мм/мин.). Об этом свидетельствует минимум зависимости $R_a(v_{\text{под}})$ в указанном диапазоне (рисунок 2.12) и высокое качество обработки поверхности (рисунок 2.11, $v_{\text{под}} = 1000$ мм/мин.). Так как данный благоприятный диапазон обусловлен "антирезонансным" эффектом границы диапазона, по-видимому, зависят от параметров упругой системы и внешних воздействий: ориентации и расстояния между годичными кольцами, геометрических параметров и частоты вращения фрезы. В то же время значительная ширина данного диапазона позволяет использовать его на практике. Можно добиться существенной производительности фрезерования, если задавать скорость подачи не заниженную с гарантированно высоким качеством обработки (600 мм/мин.), а обоснованно подобранную "антирезо-

нансную" для данной локальной области (порядка 1000 мм/мин). Такое повышение производительности возможно только с использованием обратной связи (в частности, оптического анализа обрабатываемой поверхности, предложенного ниже). Поэтому адаптивное фрезерование может повысить производительность процесса на 67 % (с 600 до 1000 мм/мин.).

При еще больших скоростях подачи (более 1600 мм/мин.) поверхности древесины передается такое количество энергии, что поверхность катастрофически разрушается (рисунок 2.11, $v_{\text{под}} = 2000$ мм/мин.), соответственно шероховатость увеличивается на порядки (участок резкого роста зависимости $R_a(v_{\text{под}})$ на рисунке 2.15, $v_{\text{под}}$ более 1700 мм/мин.)

Таким образом, в случае использования адаптивного фрезерования скорость подачи фрезы может быть не заниженной (с гарантированно высоким качеством обработки поверхности, ориентировочно 600 мм/мин.), а соответствующей антирезонансному диапазону (ориентировочно 900...1100 мм/мин.).

2.3.2 Частота вращения фрезы

Частота вращения фрезы определяет частоту контакта лезвий с древесиной и объем отщепляемого при каждом контакте фрагмента древесины, и существенно влияет на передачу энергии обрабатываемой области, а также на резонансные явления. С целью изучения влияния частоты вращения фрезы $f_{\text{ф}}$ проведена серия компьютерных экспериментов в которых варьировали $f_{\text{ф}}$ на следующих уровнях: 3750, 7500, 11250, 15000, 22500, 30000, 37500 об./мин.

Обнаружено, что качество обработки поверхности наилучшее в области частот ориентировочно от 15000 до 25000 об./мин., в которой на зависимости $R_a(f_{\text{ф}})$ наблюдается широкий минимум (рисунок 2.13).

В области малых частот (менее 10000 об./мин.) каждый проход лезвия фрезы вызывает отщепление фрагментов древесины значительных размеров, а также появление существенных напряжений в приповерхностном слое древесины. В результате этого формируются значительные флуктуации рельефа обработанной поверхности, и как следствие, довольно высокая шероховатость.

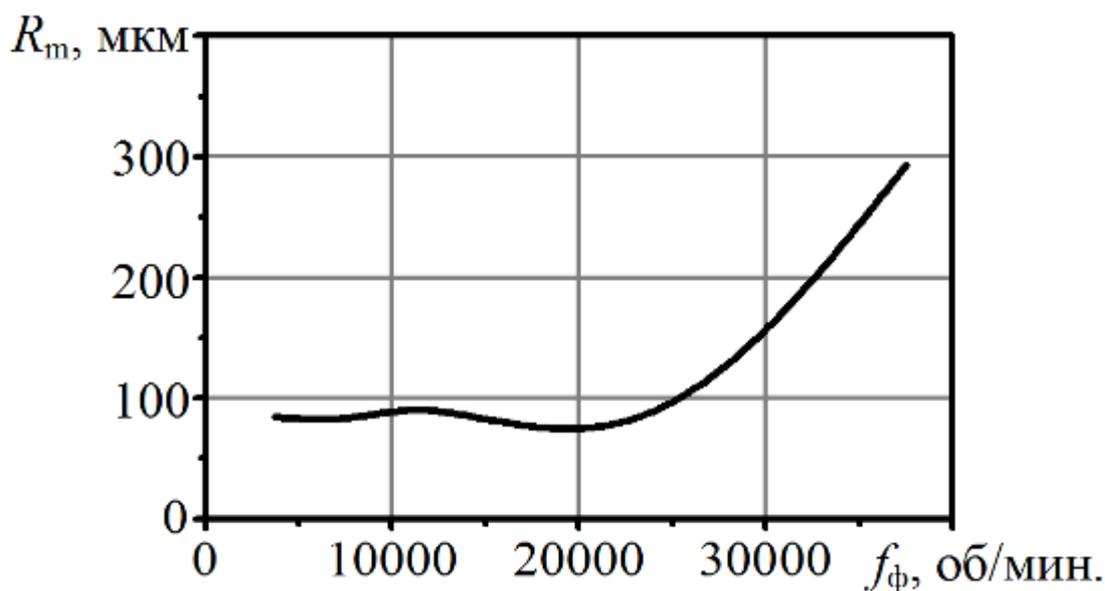


Рисунок 2.13 – Зависимость шероховатости поверхности после фрезерования R_a от частоты вращения фрезы f_ϕ

В области высоких частот вращения (более 25000 об./мин.) лезвия фрезы имеют очень высокую касательную скорость и при каждом контакте древесине передается высокая кинетическая энергия. Это приводит к существенной динамизации поверхности древесины вблизи фрезы, появлению резонансных процессов и, как следствие, к существенным нарушениям поверхности (пустоты, отслоения).

Таким образом, для заданных условий фрезерования частота вращения фрезы должна находиться в оптимальном диапазоне (ориентировочно 15000...25000 об./мин.). При меньших и больших частотах вращения ухудшается качество обработанной поверхности.

2.4 Методика оптического распознавания структуры поверхности древесины

Для определения структуры обрабатываемой поверхности целесообразно использовать метод оптического распознавания. Перед началом фрезерования элемента мебели, после его надежной фиксации необходимо сфотографировать

поверхность с определенной высоты (1–2 м для элемента мебели с габаритными размерами не более 1 м) цифровой фото- или видеокамерой и передать изображение в компьютер, управляющий фрезерным станком. Для четкого распознавания годичных слоев разрешение фотографии должно быть не менее 1280 x 960 для элемента мебели с характерным размером около 1 м. Далее необходимо скорректировать сферическое и сдвиговое искажения фотографии и привести ее к "виду сверху", для чего используются специальные подпрограммы, основанные на методах аналитической геометрии. Затем по изображению необходимо определить ориентацию волокон в исследуемой области. Остановимся подробнее на этой задаче.

На фотографию элемента мебели необходимо наложить траекторию движения фрезы и выделить множество квадратных областей (размерами от 2x2 до 10x10 мм в зависимости от разрешения фотокамеры), расположенных с равным шагом вдоль траектории. Так, в случае фрезерования окружности, вдоль траектории можно выбрать 24 локальных квадратных области (рисунок 2.14).

Для каждой квадратной области по изображению необходимо определить направление волокон. Задача оптического распознавания может быть решена, с высокой эффективностью, с использованием Фурье-анализа. Темные и светлые линии (линии выхода годичных колец) на изображении расположены приблизительно периодически, и для количественной оценки периодичности наибольшую эффективность имеет преобразование Фурье [28].

На рисунке 2.15 схематично представлена последовательность действий по определению ориентации волокон. Прежде всего, по выбранному изображению определяются функции $I(x)$ и $I(y)$, которые представляют собой зависимость интенсивности изображения (либо общей интенсивности, либо одного из каналов, например канала "B" в формате "RGB") от координаты вдоль центральных линий квадрата. Как видно из графиков на рисунке 2.15, на зависимости $I(x)$ пики расположены чаще, чем на зависимости $I(y)$, поэтому можно ожидать, что ориентация волокон должна быть скорее в направлении y , чем в x . При этом зависимости $I(x)$ и $I(y)$ близки к периодическим (синусоидальным).

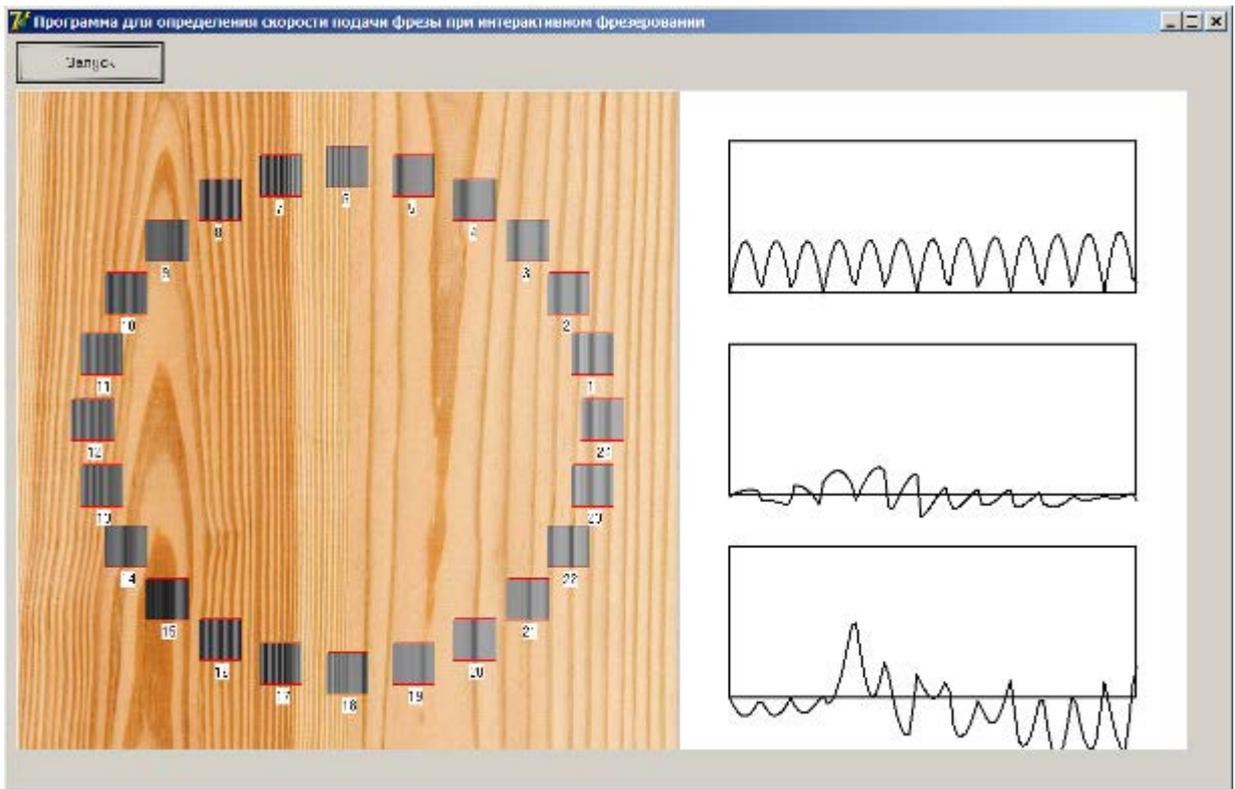


Рисунок 2.14 – Программа для определения оптимальной скорости подачи фрезы при адаптивном фрезеровании

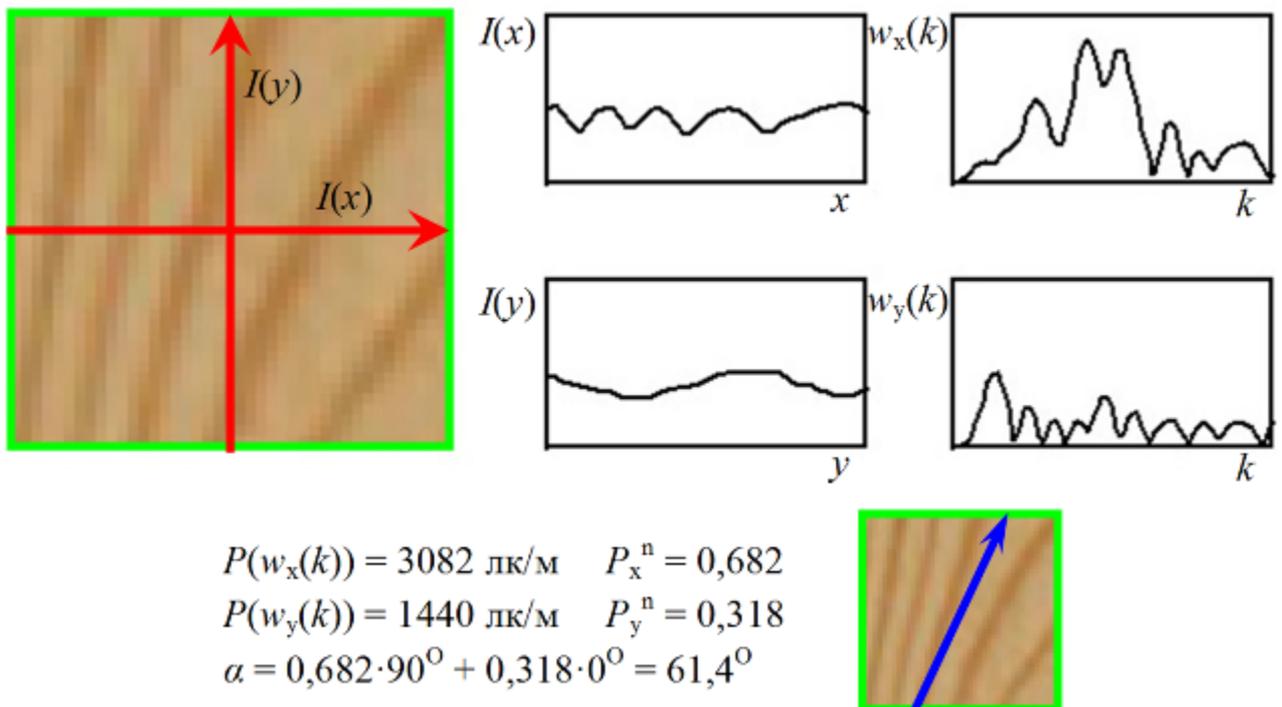


Рисунок 2.15 – Последовательность действий при определении ориентации годовичных слоев в выбранной области

Для количественной оценки того, насколько выражена периодичность в одном и в другом направлении, производится дискретное преобразование Фурье функций $I(x)$ и $I(y)$ и получаются спектры $w_x(k)$ и $w_y(k)$, где k имеет смысл обратного расстояния:

$$\begin{aligned} w_{xk} &= \sqrt{\left(\sum_{i=-l}^{+l} (I_{i_0+i, j_0} - I_{0x}) \cos(\omega ki)\right)^2 + \left(\sum_{i=-l}^{+l} (I_{i_0+i, j_0} - I_{0x}) \sin(\omega ki)\right)^2}; \\ w_{yk} &= \sqrt{\left(\sum_{i=-l}^{+l} (I_{i_0, j_0+i} - I_{0y}) \cos(\omega ki)\right)^2 + \left(\sum_{i=-l}^{+l} (I_{i_0, j_0+i} - I_{0y}) \sin(\omega ki)\right)^2}, \end{aligned} \quad (2.21)$$

где $I_{i,j}$ – интенсивность пиксела с индексами i и j ; i_0 и j_0 – индексы центра квадрата; ω – тригонометрический множитель; I_{0x} и I_{0y} – средняя интенсивность в направлениях x и y , рассчитываемая по формулам:

$$I_{0x} = \frac{1}{2l+1} \sum_{i=-l}^l I_{i_0+i, j_0}; \quad I_{0y} = \frac{1}{2l+1} \sum_{i=-l}^l I_{i_0, j_0+i}, \quad (2.22)$$

где $(2l+1)$ – длина стороны квадрата.

По положению пиков спектров (рисунок 2.15) можно судить о характерной периодичности изображения в данном направлении, а по высоте пиков – о степени выраженности периодичности. Для определения направления волокон необходимо оценить относительный вклад периодичности в направлениях x и y . Для этого далее необходимо рассчитать мощности P_x и P_y спектров $w_x(k)$ и $w_y(k)$ и пронормировать их:

$$\begin{aligned} P_x &= \sqrt{\sum_{i=0}^{k_{\max}} w_{xk}^2}; \quad P_y = \sqrt{\sum_{i=0}^{k_{\max}} w_{yk}^2}; \\ P_x^n &= P_x / (P_x + P_y); \quad P_y^n = P_y / (P_x + P_y), \end{aligned} \quad (2.23)$$

где k_{\max} – верхняя граница анализируемого интервала обратных расстояний (определяется наименьшим возможным расстоянием между годичными слоями); P_x^n и P_y^n – нормированные мощности спектров.

По количественным оценкам периодичности в одном и другом направлении P_x^n и P_y^n можно найти угол ориентации волокон α :

$$\alpha = \begin{cases} 90^\circ P_x^n + 0^\circ P_y^n, & P_{d1} < P_{d2}; \\ 90^\circ P_x^n + 180^\circ P_y^n, & P_{d1} > P_{d2}, \end{cases} \quad (2.24)$$

где P_{d1} и P_{d2} – мощности спектров от диагональных направлений.

Необходимо пояснить, что помимо основных направлений x и y необходимо исследование диагональных направлений d_1 (угол 45°) и d_2 (угол -45°), чтобы снять неопределенность в определении угла α . При этом рассчитываются спектры от функций интенсивности в диагональных направлениях, а затем мощности этих спектров (аналогично вышеизложенному):

$$\begin{aligned} w_{d1k} &= \sqrt{\left(\sum_{i=-l}^{+l} (I_{i_0+i, j_0+i} - I_{0d1}) \cos(\omega ki) \right)^2 + \left(\sum_{i=-l}^{+l} (I_{i_0+i, j_0+i} - I_{0d1}) \sin(\omega ki) \right)^2}; \\ w_{d2k} &= \sqrt{\left(\sum_{i=-l}^{+l} (I_{i_0+i, j_0+i} - I_{0d2}) \cos(\omega ki) \right)^2 + \left(\sum_{i=-l}^{+l} (I_{i_0+i, j_0+i} - I_{0d2}) \sin(\omega ki) \right)^2}; \\ I_{0d1} &= \frac{1}{2l+1} \sum_{i=-l}^l I_{i_0+i, j_0+i}; \quad I_{0d2} = \frac{1}{2l+1} \sum_{i=-l}^l I_{i_0+i, j_0-i}; \\ P_{d1} &= \sqrt{\sum_{i=0}^{k_{\max}} w_{d1k}^2}; \quad P_{d2} = \sqrt{\sum_{i=0}^{k_{\max}} w_{d2k}^2}. \end{aligned} \quad (2.25)$$

На рисунках 2.16 и 2.17 приведены несколько примеров определения ориентации волокон для 24 квадратных локальных областей, расположенных вдоль круговой траектории подачи фрезы. Изображения получены с помощью специально разработанной компьютерной программы (рисунок 2.17, приложение Ж), которую в дальнейшем можно преобразовать в dll-библиотеку, под-

ключаемую к управляющей программе фрезерного станка. Как видно из рисунков, ориентация волокон определяется безошибочно для самых разных изображений. Предложенный метод является в высокой степени универсальным: эффективен широкого набора пород древесины, широких диапазонов расстояний между годичными слоями и самых разных конфигураций линий выхода годичных слоев.

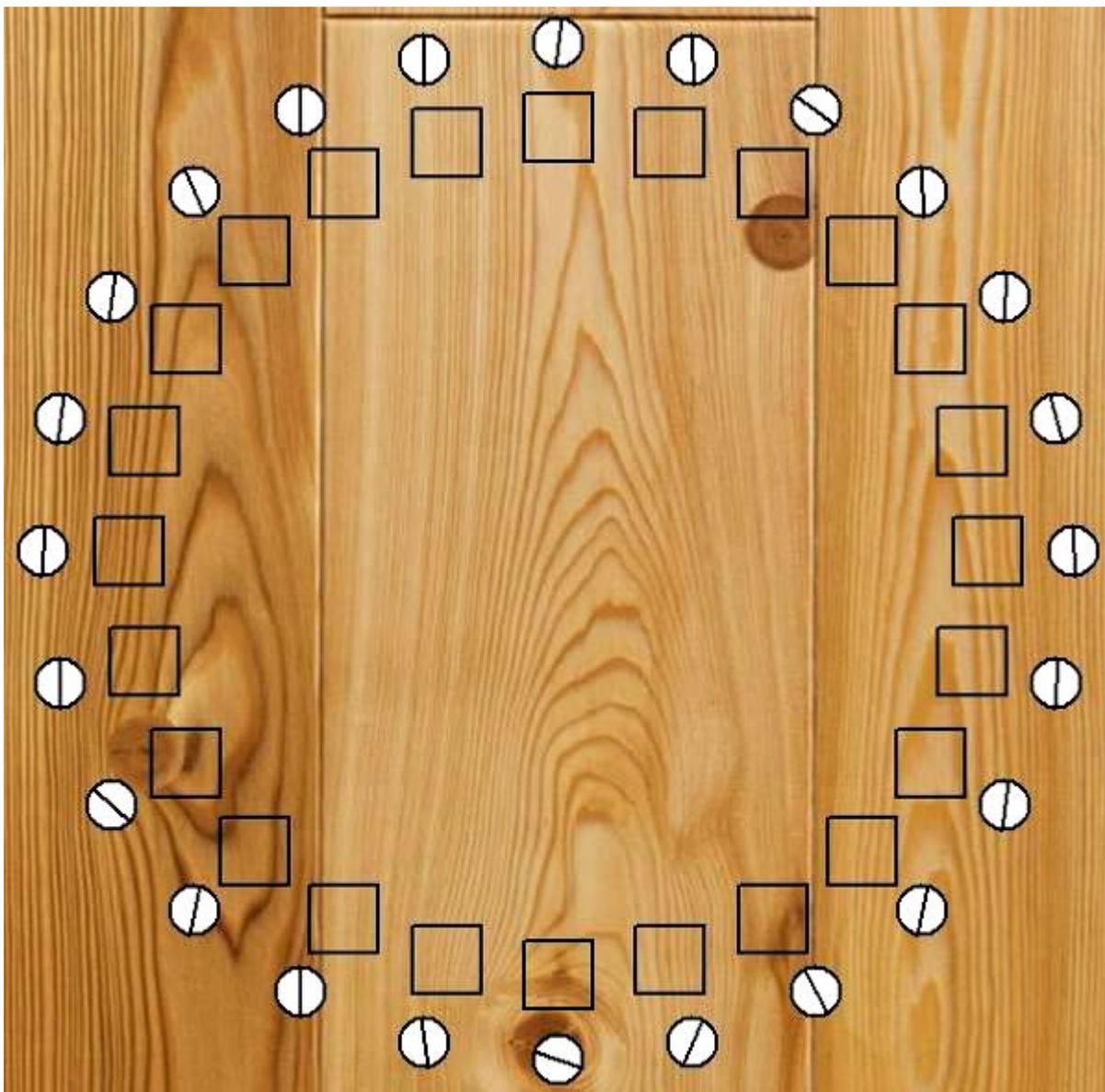


Рисунок 2.16 – Пример определения ориентации волокон в локальных областях вдоль траектории фрезерования, выполненный разработанным методом

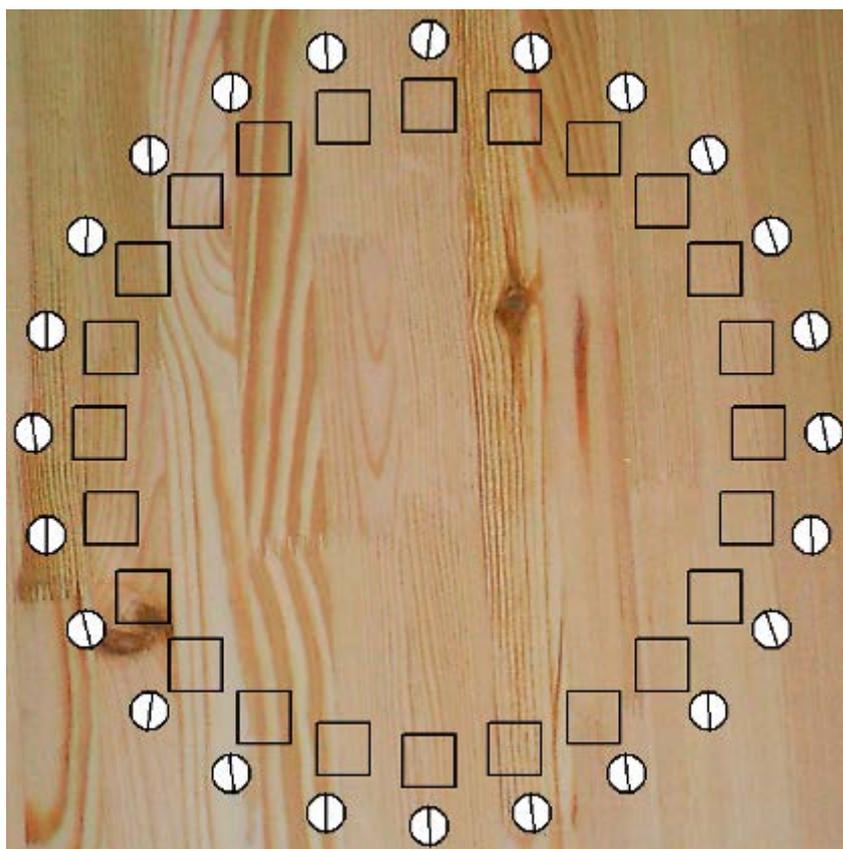
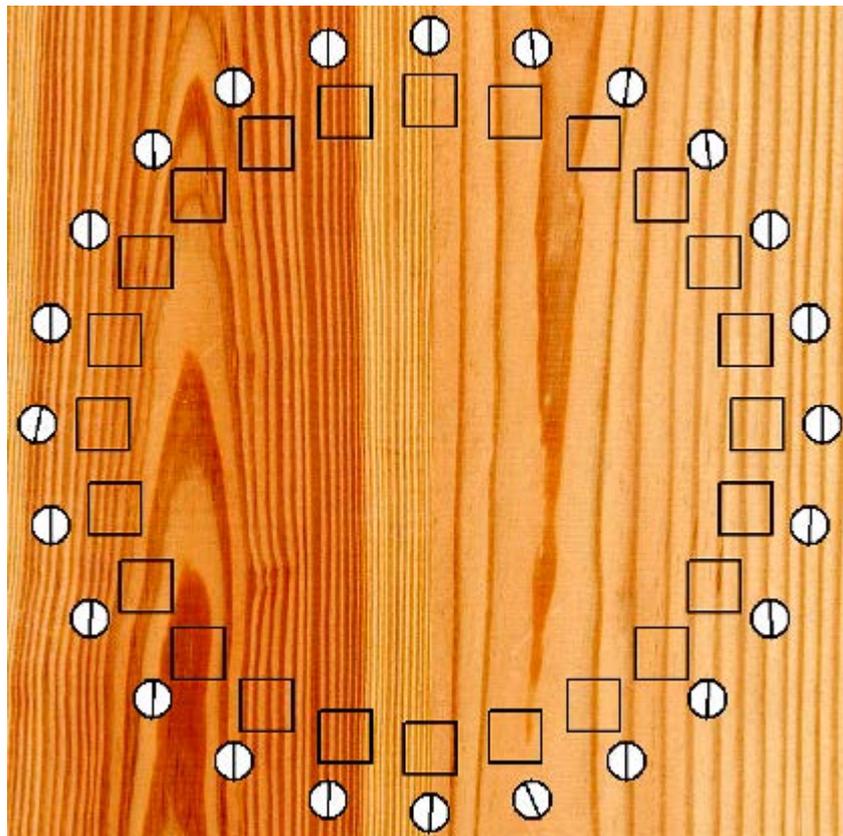


Рисунок 2.17 – Другие примеры определения ориентации волокон в локальных областях вдоль траектории фрезерования, выполненные разработанным методом

2.5 Технология адаптивного декоративного фрезерования

Предлагаемая технология адаптивного декоративного фрезерования заключается в изменении технологических параметров процесса фрезерования (в частности, скорости подачи фрезы) в зависимости от структуры поверхности древесины в месте обработки. Для адаптивного декоративного фрезерования целесообразно использовать предложенную выше методику оптического распознавания ориентации волокон.

Как было показано выше, адаптивный подход позволяет существенно повысить производительность и качество фрезерования анизотропных материалов. Для изотропных же древесных материалов, в частности МДФ, также может быть применен адаптивный подход к декоративному фрезерованию. Во-первых, адаптивный подход позволяет согласовать технологические параметры между собой: например, при движении фрезы по сложной траектории может изменяться скорость подачи, при этом можно согласованно изменять частоту вращения фрезы для сохранения высокого качества обрабатываемой поверхности. Во-вторых, адаптивный подход позволяет выбирать рациональные технологические параметры в зависимости от внешних параметров, в частности, влажности материала. Даже незначительное изменение влажности поверхности МДФ приводит к необходимости существенно изменять технологические режимы фрезерования.

В этой связи проведено экспериментальное исследование, в котором согласованно изменяли упомянутые параметры: технологические (скорость подачи $v_{\text{под}}$, частота вращения ω фрезы, диаметр фрезы $d_{\text{ф}}$) и внешней среды (влажность поверхности материала f). Целью данного исследования был экспериментальный поиск аналитической зависимости между $v_{\text{под}}$, ω , $d_{\text{ф}}$ и f , которую можно будет использовать, как основу для адаптивного декоративного фрезерования МДФ.

После определения угла ориентации волокон α (что делается с использованием методики оптического распознавания структуры поверхности древеси-

ны), необходимо сравнить этот угол с углом траектории движения фрезы β в данной локальной области и выбрать скорость подачи фрезы. Для этого, по результатам экспериментальных исследований, предлагается выражение следующего вида:

$$v_{под} = \frac{v_{под}^0 + v_{под}^{90}}{2} + \frac{v_{под}^0 - v_{под}^{90}}{2} \cos 2(\alpha - \beta), \quad (2.26)$$

где $v_{под}$ – скорость подачи фрезы в данной точке траектории; $v_{под}^0$ и $v_{под}^{90}$ – оптимальные скорости подачи фрезы вдоль волокон и поперек волокон, обеспечивающие наименьшие шероховатость и повреждения поверхности.

На рисунке 2.18 рассчитаны скорости подачи фрезы $v_{под}$ для каждого из 24 изображений. Для большей наглядности на рисунке 2.19 черной линией показана траектория движения фрезы, при этом толщина линии пропорциональна рекомендуемой скорости подачи фрезы. Как видно из рисунка, целесообразно изменять в широких пределах скорость подачи фрезы в процессе обработки.

Таким образом, окончательное выражение для определения оптимальной скорости подачи фрезы при адаптивном фрезеровании можно записать следующим образом.

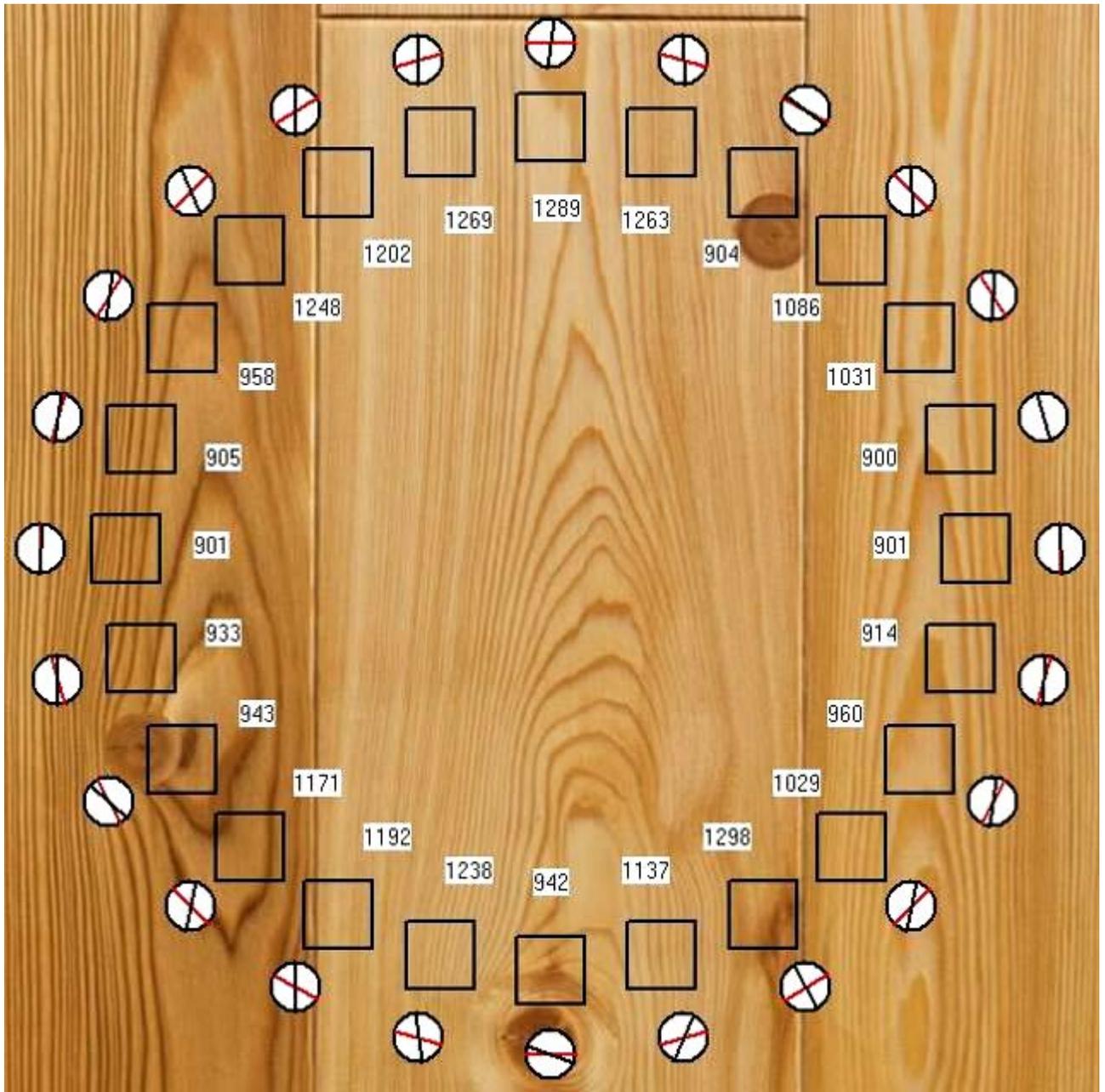


Рисунок 2.18 – Сопоставление угла траектории и угла ориентации волокон (соответственно красный и черный отрезки в кругах) и результаты определения локальных скоростей подачи (числа, в мм/мин. у квадратов)

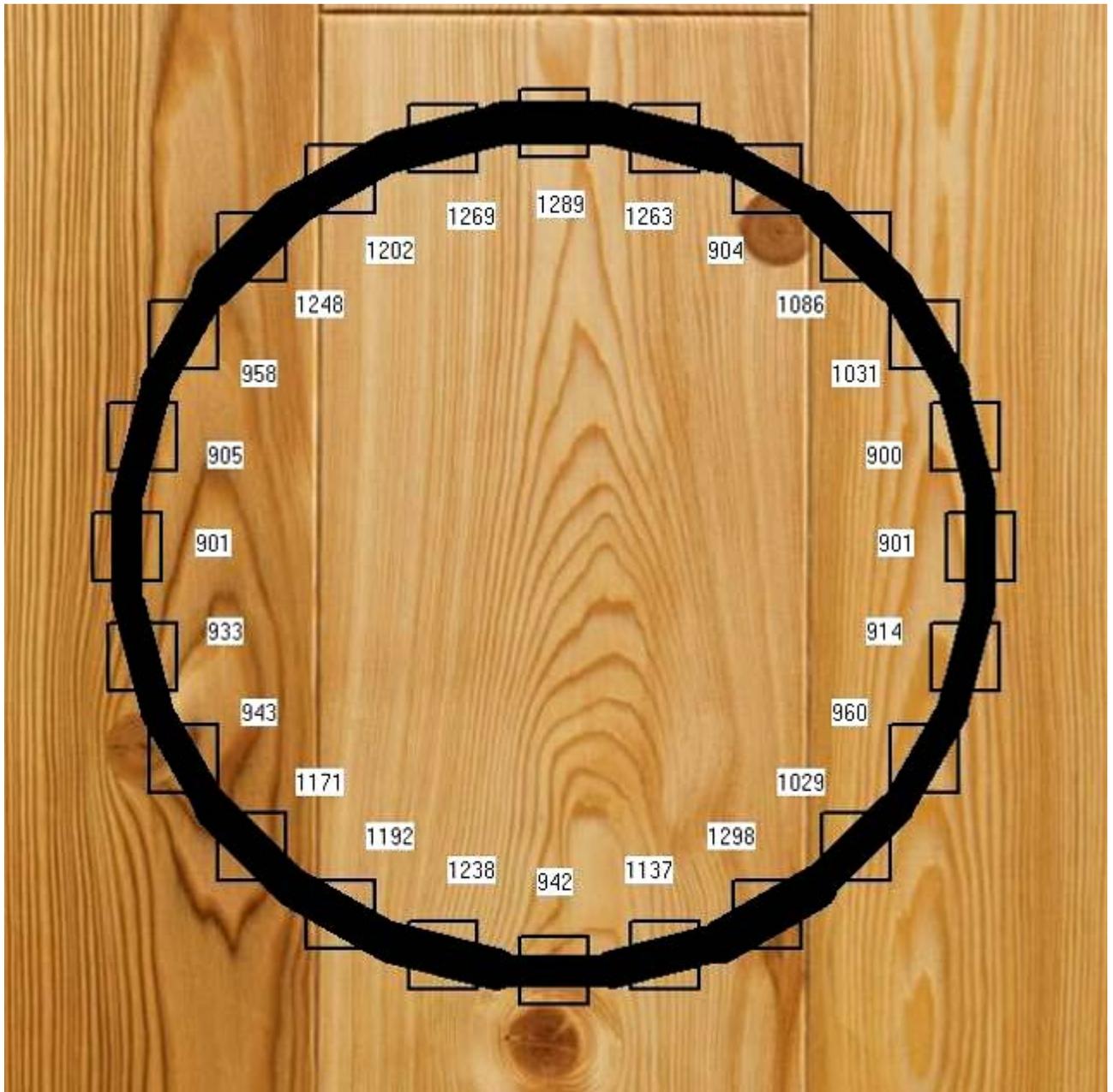
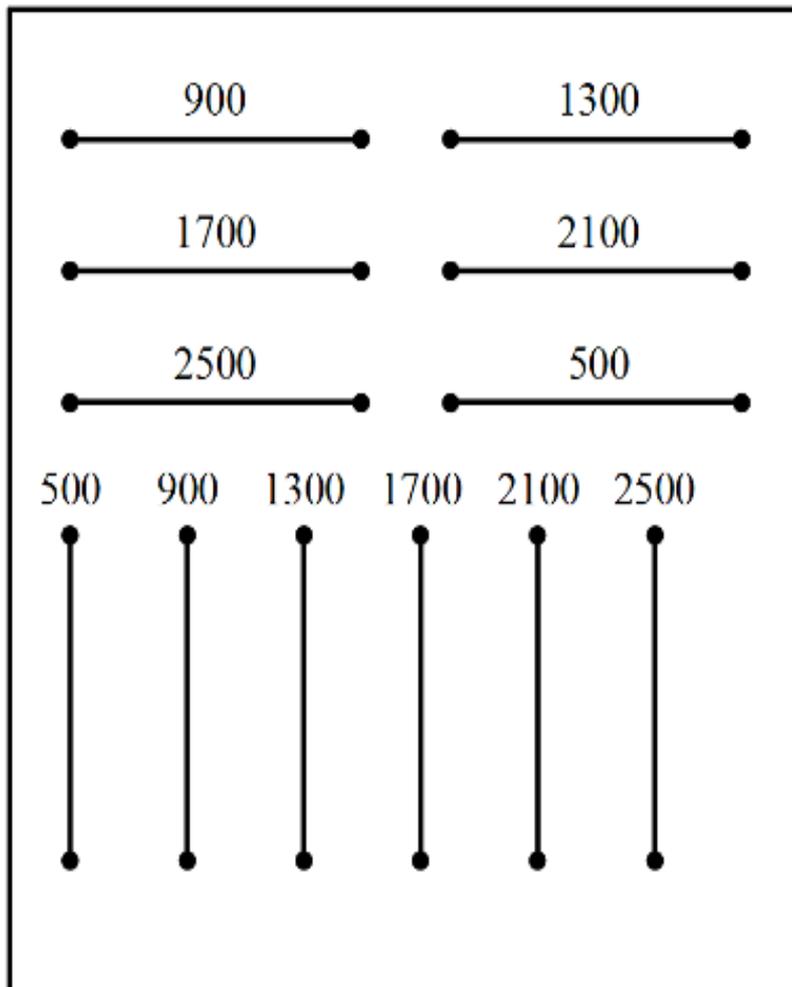


Рисунок 2.19 – Наглядная демонстрация изменения скорости подачи фрезы вдоль траектории. Толщина линии пропорциональна скорости подачи. Скорость подачи фрезы указана числами (в мм/мин.)



(2.27)

Предложенный математический аппарат может быть как непосредственно встроен в управляющую программу, так и реализован в виде отдельных модулей (dll-библиотек и API-функций).

2.6 Выводы

1. Разработана физико-математическая модель фрезерования древесины с заданной структурой приповерхностного слоя. Модель позволяет задавать различные технологические параметры процесса фрезерования (скорость подачи, частоту вращения, глубину обработки) и определить их влияние, с учетом заданной структуры поверхности древесины, на показатели качества обработки, в частности шероховатость обработанной поверхности.

2. Предлагаемая модель может быть как встроена в систему управления фрезерным станком для адаптивного фрезерования, так и может использоваться для подготовки рекомендаций по повышению производительности фрезерования анизотропных поверхностей.

3. В случае учета структуры поверхности древесины производительность фрезерования может быть повышена на 10–30 %, средняя шероховатость – снижена на 10–50 %, и уменьшено количество повреждений поверхности (в частности, сколов).

4. С точки зрения повышения качества формируемой поверхности наиболее неблагоприятными углами ориентации годовичных колец по отношению к направлению подачи фрезы являются углы $0...45^{\circ}$. При фрезеровании таких направлений в древесине целесообразно уменьшать скорость подачи фрезы.

5. На участках поверхности фрезеруемой древесины, в которых расстояние между годовичными кольцами менее 1 мм, целесообразно снижение скорости подачи фрезы (либо частоты вращения), для уменьшения энергетического воздействия на древесину и исключения образования углублений. При расстоянии между годовичными кольцами более 1 мм качество формируемой поверхности практически не зависит от расстояния между годовичными кольцами.

6. В случае использования адаптивного фрезерования скорость подачи фрезы может быть не заниженной (с гарантированно высоким качеством обработки поверхности, ориентировочно 600 мм/мин. для декоративного фрезерования), а соответствующей антирезонансному диапазону (ориентировочно

900...1100 мм/мин.).

7. Для заданных условий фрезерования частота вращения фрезы должна находиться в оптимальном диапазоне (ориентировочно 15000...25000 об./мин.). При меньших и больших частотах вращения ухудшается качество обработанной поверхности.

8. Разработана методика оптического распознавания структуры поверхности древесины, основанная на дискретном преобразовании Фурье.

9. Предложена технология адаптивного декоративного фрезерования. В процессе фрезерования оптимальная скорость подачи фрезы выбирается в зависимости от угла между направлением движения фрезы и направлением волокон на поверхности в месте фрезерования, определяемом по оптическому изображению фрезеруемой поверхности.

3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На этапе экспериментальных исследований необходимо оценить работоспособность и эффективность предлагаемой технологии адаптивного фрезерования и определить оптимальные технологические параметры. Экспериментальное исследование необходимо провести в три этапа. На первом этапе необходимо обосновать необходимость использования переменной скорости подачи фрезы в зависимости от направления движения по отношению к направлению волокон, а также экспериментальным путем определить оптимальные скорости подачи вдоль и поперек волокон для различных пород древесины. На втором этапе необходимо экспериментально проверить технологию фрезерования с переменной скоростью на относительно сложной траектории (выбрана замкнутая квадратная траектория). На третьем этапе необходимо проверить применимость адаптивного подхода к выбору технологических параметров для других древесных материалов, в частности изотропных плит МДФ.

3.1 Экспериментальная фрезерная установка

Экспериментальное исследование проводили с использованием фрезерного станка PLRA4 с числовым программным управлением (ЧПУ) (рисунок 3.1). Данный станок предназначен для использования малыми предприятиями для 2D/3D фрезерования различных легкообрабатываемых материалов – дерева, пластика, текстолита, цветных металлов.

Станок PLRA4 – вертикально-фрезерный, порталного типа. Станок может выполнять операции: фрезерования, сверления, гравировки и резки (рисунок 3.1). Рабочая область обработки станка 560 x 380 x 105 мм³. Максимальная рабочая скорость подачи до 5000 мм/мин., дискретность позиционирования 0,01 мм, повторяемость позиционирования 0,05 мм. По своим техническим характеристикам данный фрезерный станок полностью подходит для поставленных задач на экспериментальное исследование.

Схема системы управления станком ЧПУ и схема подключения показаны на рисунках 3.2 и 3.3.



Рисунок 3.1 – Фрезерный станок PLRA4 в процессе экспериментальных исследований

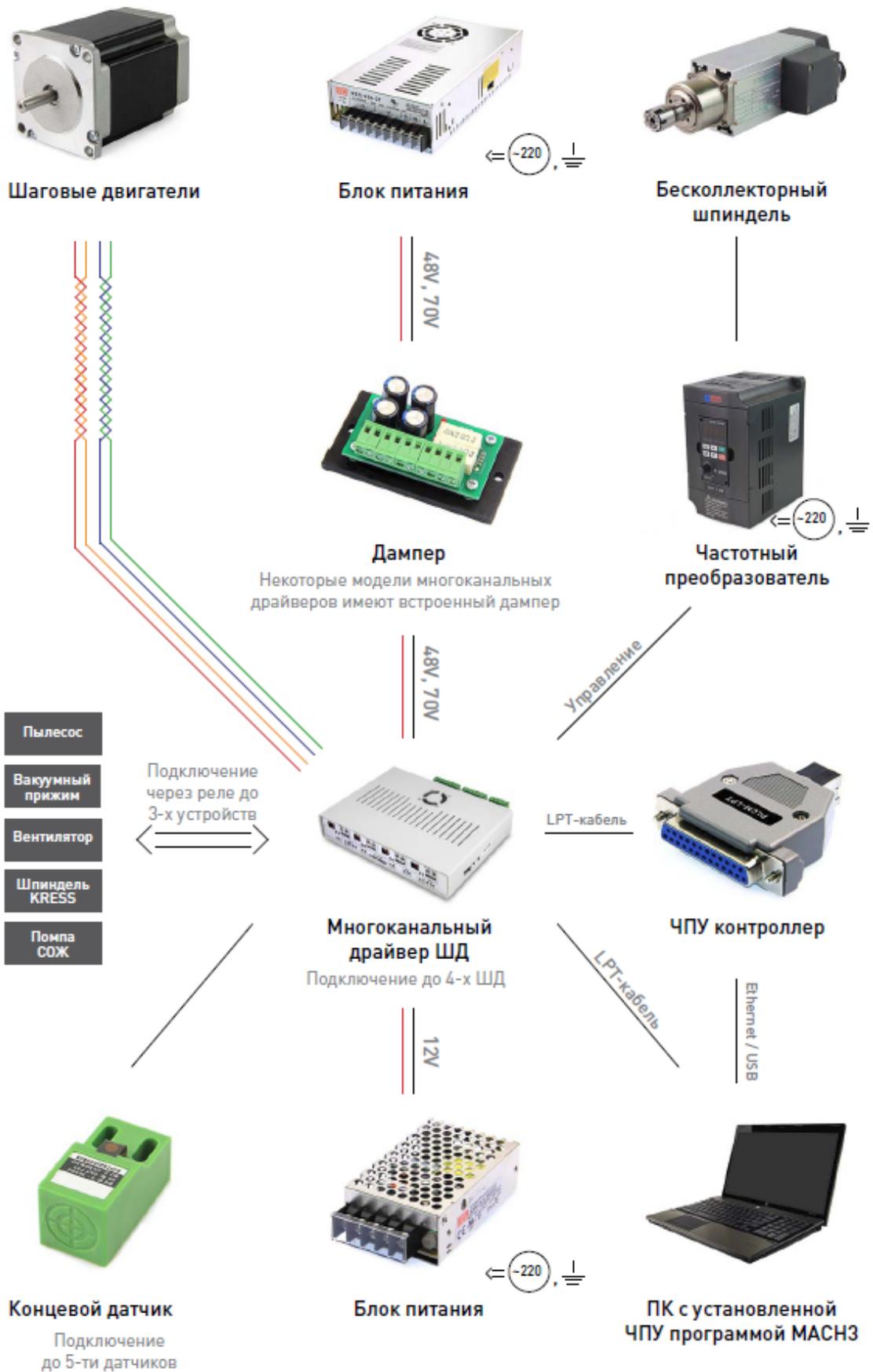


Рисунок 3.2 – Общая схема системы управления используемого станка с ЧПУ

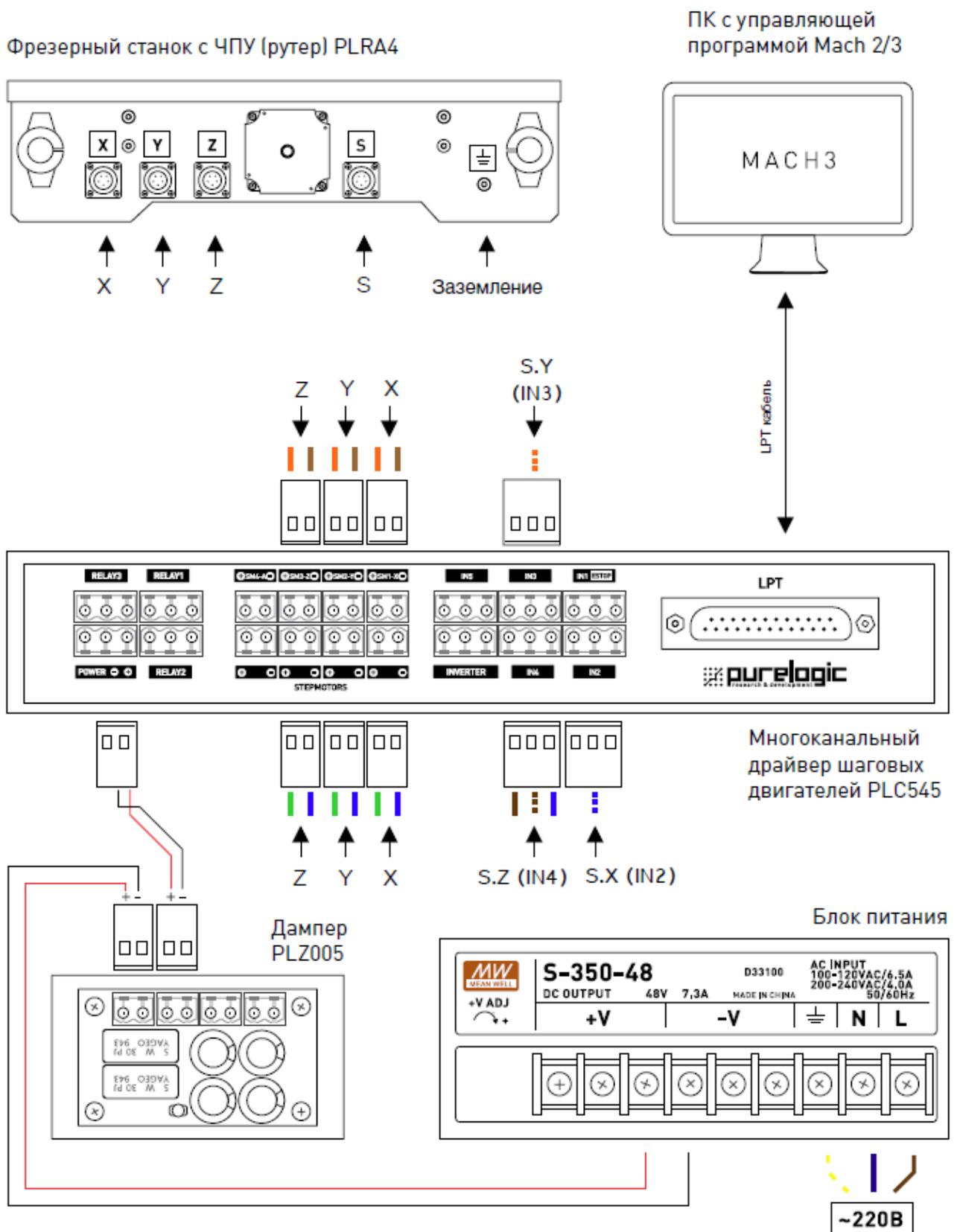


Рисунок 3.3 – Схема подключения станка PRLA4 к управляющему персональному компьютеру

Для создания чертежей и контуров обработки декоративных элементов мебели используют CAD/CAM программы. Выдаваемый этими системами результат, называемый управляющей программой для станка с ЧПУ и представленный в виде так называемого G-кода, передается в контроллер станка. Контроллер станка отвечает за перевод управляющей программы в вид, подходящий для управления режущим инструментом. Оси станка двигаются за счет направляющих, которые связаны с серводвигателями или шаговыми двигателями. Драйверы проверяют, достаточно ли мощны и допустимы по времени сигналы, поступающие от контроллера станка, для того чтобы оперировать двигателями. Контроллер станка управляет запуском и остановкой вращения шпинделя и его частотой вращения, включает и выключает охлаждение, а также проверяет, не выходит ли область обработки за границы рабочей зоны. Для управления станком используется программный пакет Mach3, который запускается на ПК, и предоставляет широкие возможности для управления станком (рисунок 3.4).

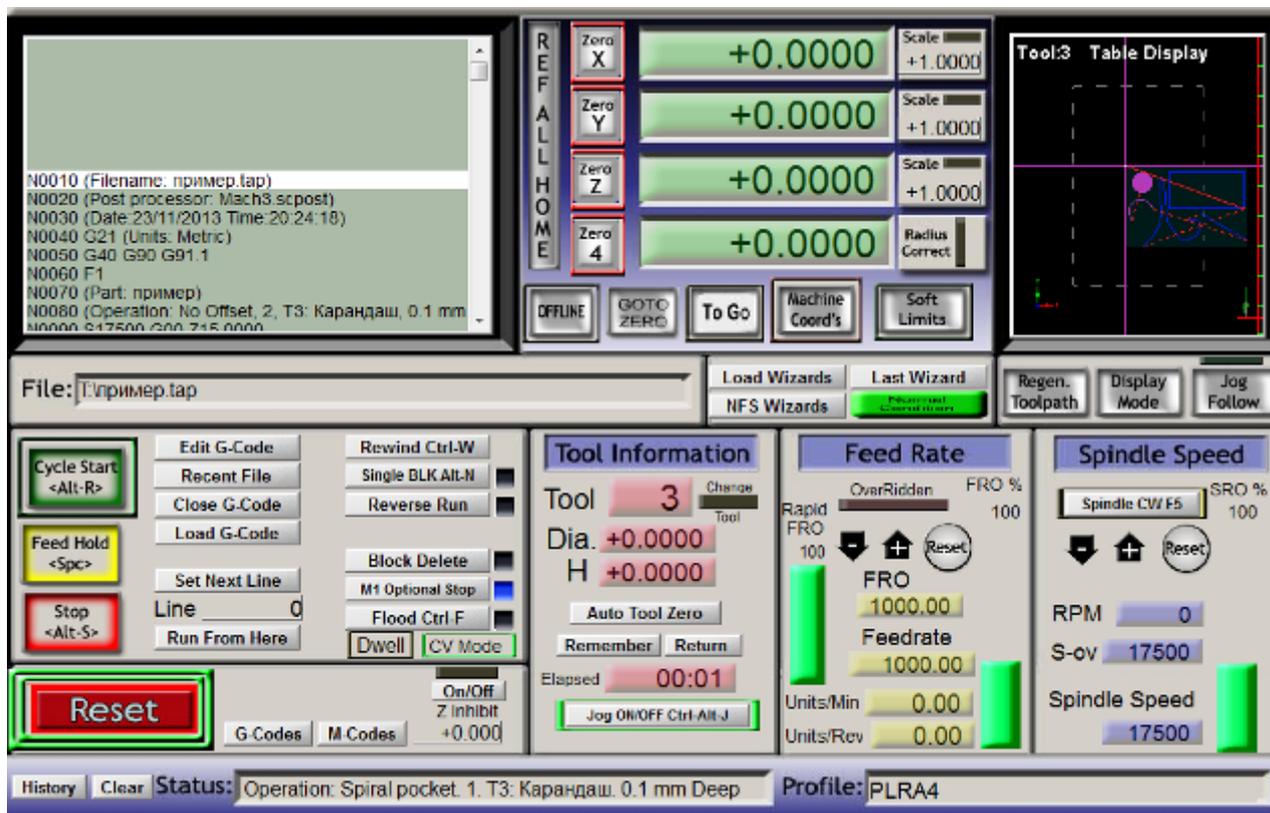
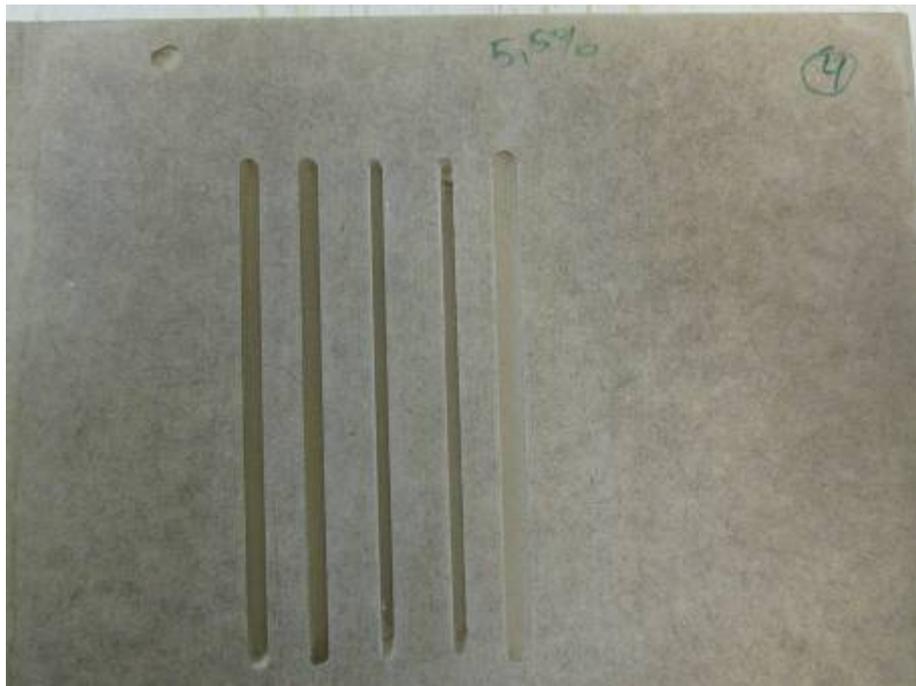


Рисунок 3.4 – Интерфейсная форма программы Mach3 для управления фрезерным станком



a



б

Рисунок 3.5 – Примеры обработанных образцов в результате разведывательных экспериментов: заготовки из сосны вдоль и поперек волокон с различной скоростью подачи (*a*); заготовки из МДФ влажностью 5,5 % фрезами различного диаметра (*б*)

Инструмент зажимается в цанге станка PRLA4 вручную. Кнопками на клавиатуре суппорт перемещается в предполагаемое место начала координат и программа производит запоминание данного положения, как начала координат. Скорость подачи фрезы в мм/мин можно задавать и контролировать в специальном окне Feed Rate на общем экране программы Mach3 (Рисунок 3.4).

Примеры обработанных в процессе экспериментальных исследований поверхностей древесины и МДФ приведены на рисунке 3.5.

Для первого и второго этапа экспериментальных исследований использовали пазовую галтельную V-образную фрезу (с углом конуса 90°) для работы по древесине. Внешний вид и геометрические параметры фрезы представлены на рисунке 3.6. Частота вращения данной фрезы в процессе экспериментов составляла 18 000 об/мин.

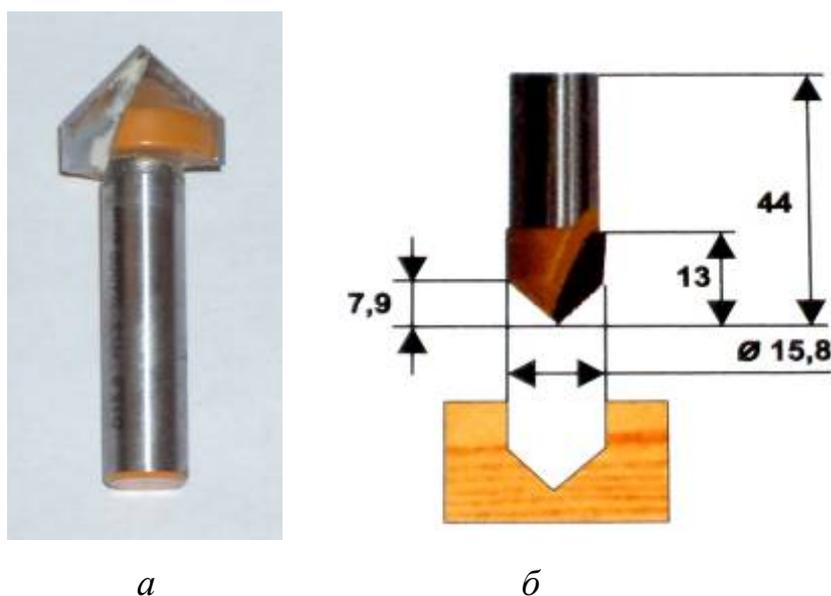


Рисунок 3.6 – Внешний вид (а) и геометрические параметры фрезы, используемой в экспериментальных исследованиях

V-образная форма фрезы была выбрана по следующим соображениям. Так как возможно множество вариантов фрезерования (встречное и попутное, боковое и "по пласти", с различной ориентацией фрезеруемой поверхности по направлению к поверхности детали и т.п.), было принято решение упростить (и

тем самым повысить управляемость) геометрическую форму обрабатываемого паза до V-образного сечения, с углами наклона стенок 45° по отношению к лицевой поверхности детали.

3.2 Образцы древесины для экспериментальных исследований

Для экспериментальных исследований были подготовлены образцы древесины трех пород (сосна, береза, дуб) по 4 образца. Размеры древесной заготовки составляли 400 x 200 x 30 мм. На каждой заготовке планировалось выполнить по 4 задания на фрезерования (ряды канавок): слева и справа сверху, слева и справа снизу. Таким образом для каждой породы планировалось выполнить по 16 заданий на фрезерование. Волокна древесины были ориентированы вдоль продольной оси заготовки.

Плотность образцов древесины измеряли по ГОСТ 16483.1-84. Содержание годичных слоев в 1 см и содержание поздней древесины в годичном слое определяли по ГОСТ 16483.18-72.

3.3 Методика определения показателей качества обработанной поверхности

Основным выходным показателем в экспериментальных исследованиях было качество поверхности после фрезерования. Для оценки качества использовали как метод визуального анализа для определения типа и причин повреждений поверхности, так и измерение шероховатости поверхности для количественной оценки качества.

Остановимся подробнее на методике измерения шероховатости поверхности. шероховатость поверхности – это совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенная с помощью базовой длины [45]. Фрезерование при производстве мебели приводит к горизонтальному шагу неровностей в пределах 1-1000 мкм, с высотой – от 0,01 до 10 мкм.

Геометрические параметры, по которым определяется шероховатость поверхности показаны на рисунке 3.6: l – базовая длина; m – средняя линия профиля; S_{mi} – средний шаг неровностей профиля; S_i – средний шаг местных выступов профиля; $H_{i\ max}$ – отклонение пяти наибольших максимумов профиля; $H_{i\ min}$ – отклонение пяти наибольших минимумов профиля; $h_{i\ max}$ – расстояние от высших точек пяти наибольших максимумов до линии параллельной средней и не пересекающей профиль; $h_{i\ min}$ – расстояние от низших точек пяти наибольших минимумов до линии параллельной средней и не пересекающей профиль; R_{max} – наибольшая высота профиля; y_i – отклонения профиля от линии m ; p – уровень сечения профиля; b_n – длина отрезков, отсекаемых на уровне p .

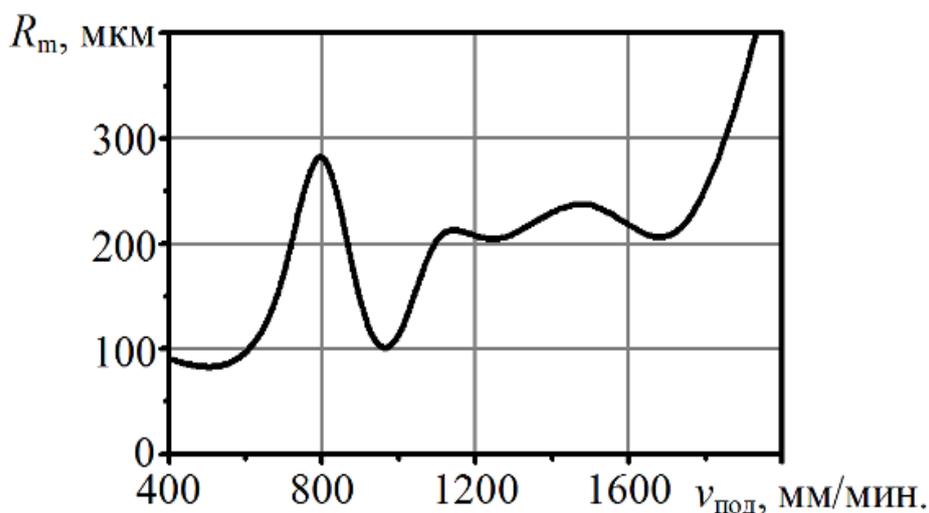


Рисунок 3.6 – Схема определения шероховатости поверхности

Шероховатость обычно характеризуется тремя показателями R_a , R_z , R_m , каждый из которых определяется своим способом. R_a – среднее арифметическое отклонение профиля, рассчитываемое по формуле:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y_i| dx. \quad (3.1)$$

R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 H_{imax} - \sum_{i=1}^5 H_{imin}}{5}; \quad (3.2)$$

R_{max} – наибольшая высота профиля.

Для измерения шероховатости в экспериментальных исследованиях использовался профилометр Hommel Tester 100 (рисунки 3.7–3.9). Измерение шероховатости поверхности производили по ГОСТ 25142-82 и ГОСТ 19300-86.



Рисунок 3.7 – Проведение лабораторного эксперимента



Рисунок 3.8 – Профилометр Hommel Tester 100

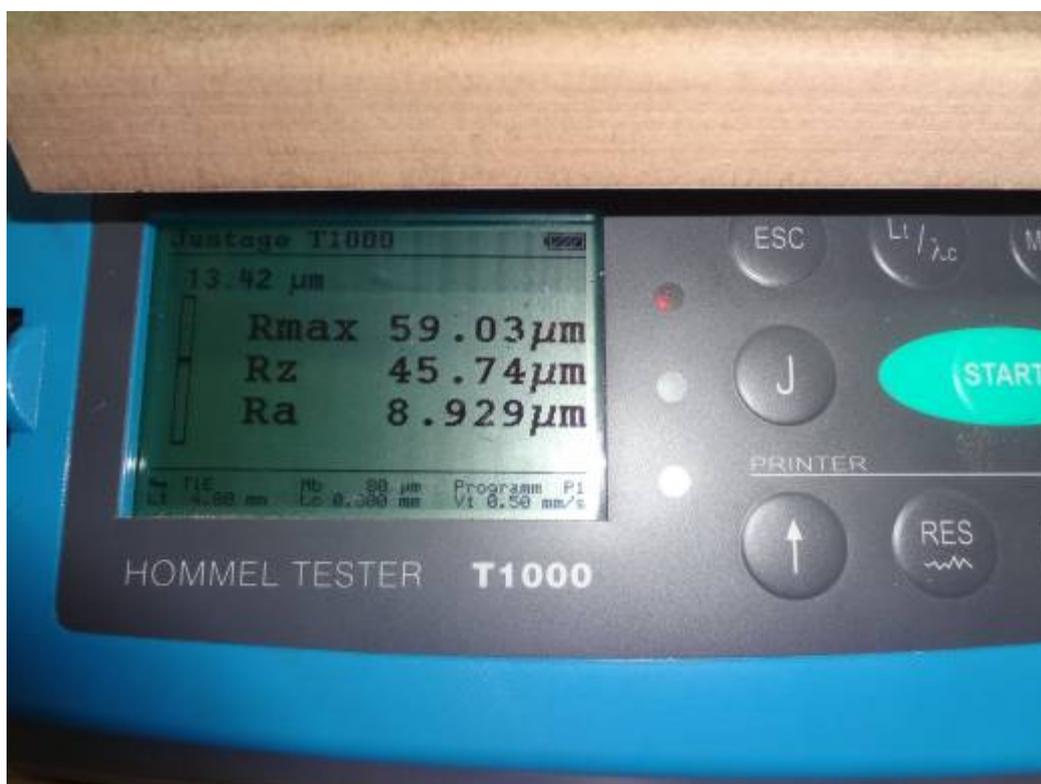


Рисунок 3.9 – Результаты измерений шероховатости поверхности на панели индикации прибора Hommel Tester 100

3.4 Стратегия и порядок проведения экспериментального исследования

Предварительное планирование эксперимента необходимо для того, чтобы максимально сократить время и трудозатраты на проведение эксперимента, однако получить при этом максимальное количество и качество результатов. Планирование эксперимента проводили в соответствии с [8, 33, 47]. На рисунке 3.10 в графической форме представлены задания на три этапа экспериментальных исследований.



Рисунок 3.10 – Постановка задачи на этапы экспериментального исследования

Первые два этапа экспериментального исследования носили как качественный, так и количественный характер, третий этап – носил только количественный характер, поэтому к нему применена методология планирования экспе-

римента, на которой остановимся более подробно. Из параметров режимов резания наиболее существенное влияние на величину шероховатости поверхности оказывают скорость резания и подачи инструмента [47]. При системном анализе фрезерования деталей мебели [21] структурная схема этого процесса представлена рисунком 3.10, III этап.

В схеме используются следующие информационные показатели:

1. Задающие воздействия:

$v_{\text{под}}$ – скорость подачи инструмента, мм/мин;

ω – частота вращения фрезы, об/мин.

2. Возмущающее воздействие f – влажность древесного материала в %.

3. Целевые функции управления процессом фрезерования:

чистота обработки, определяемая шероховатостью поверхности в виде показателей R_a, R_z, R_{max} ;

P – производительность фрезерной обработки в секундах⁻¹.

Для представления выходных функций выбраны многочлены следующего вида:

$$\begin{aligned}
 R &= a_0 + a_1 v_{\text{под}} + a_2 \omega + a_3 f + a_{11} v_{\text{под}}^2 + a_{22} \omega^2 + a_{33} f^2 + \\
 &+ a_{12} v_{\text{под}} \omega + a_{13} v_{\text{под}} f + a_{23} \omega f; \\
 P &= b_0 + b_1 v_{\text{под}} + b_2 \omega + b_3 f + b_{11} v_{\text{под}}^2 + b_{22} \omega^2 + b_{33} f^2 + \\
 &+ b_{12} v_{\text{под}} \omega + b_{13} v_{\text{под}} f + b_{23} \omega f.
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

В результате проведения активных экспериментов необходимо было определить значения коэффициентов $a_0, a_1, \dots, a_{23}; b_0, b_1, \dots, b_{23}$.

Составлен план активных экспериментов. Исходя из возможностей станка с ЧПУ и свойств материала для фрезерования [89, 118] определено минимальное, максимальное и среднее значение скоростей подачи $v_{\text{под}}$ и резания ω .

$v_{\text{под}}$, мм/мин, ω , об/мин

$$v_{min}=500=(-1); v_{max}=2500=(+1); v_{cp}=\frac{v_{max} + v_{min}}{2} = \frac{500 + 2500}{2} = 1500=(0); \quad (3.4)$$

$$\omega_{min}=10000=(-1); \omega_{max}=2500000=(+1); \quad (3.5)$$

$$\omega_{cp}=\frac{\omega_{max} + \omega_{min}}{2} = \frac{10000 + 25000}{2} = 17500=(0). \quad (3.6)$$

Матрица планирования эксперимента приведена в разделе 4 вместе с результатами измерений. Строки с 1 по 8 считаются опытами центрального композиционного плана, с 9 по 12 – опытами в центре эксперимента.

3.5 Выводы

1. Выбран и подготовлен к экспериментальным исследованиям фрезерный станок с ЧПУ PRLA4. Подготовлены образцы древесины различных пород (сосна, береза, дуб) и МДФ различной влажности.

2. Для экспериментальных исследований выбрана фреза V-образной формы, которая позволяет получить максимальную и достоверную информацию о шероховатости поверхности при минимальном количестве экспериментов.

3. Измерения шероховатости проводились профилометром Hommel Tester 100, обеспечивающим высокую точность и удобство измерений.

4. Разработана стратегия и план экспериментального исследования адаптивной технологии фрезерования древесины и МДФ. Определен набор варьируемых параметров, разработан план лабораторного экспериментального исследования, сформулированы критерии экспериментального исследования.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ С УЧЕТОМ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ

Экспериментальное исследование проводилось с целью изучения возможности и целесообразности использования при декоративном фрезеровании древесины переменной скорости подачи в зависимости от структуры поверхности детали. Экспериментальное исследование проводили в три этапа. На первом этапе, для различных пород древесины определяли оптимальные скорости подачи вдоль $v_{\text{под}}^0$ и поперек $v_{\text{под}}^{90}$ волокон, при которых качество и шероховатость поверхности были наилучшими. На втором этапе исследовали возможность адаптивного фрезерования древесины с более сложной траекторией движения фрезы. На третьем этапе изучали возможность применения адаптивного фрезерования при обработке изотропного материала МДФ различной влажности.

4.1 Экспериментальный поиск оптимальных скоростей подачи фрезы вдоль и поперек волокон для древесины различных пород

В первой серии экспериментов проводили фрезерование древесной заготовки вдоль и поперек волокон с различными скоростями подачи (500, 900, 1300, 1700, 2100, 2500 мм/мин), для различных пород древесины (сосна, береза, дуб). Задачей данной серии экспериментов было определение оптимальных с точки зрения качества поверхности скоростей подачи фрезы вдоль и поперек волокон.

Задание на фрезерование для станка PRLA4 состояло в прохождении двухперьевой фрезой треугольного профиля шести канавок в направлении поперек волокон и шести канавок в направлении вдоль волокон (рисунок 4.1) с разными скоростями подачи. По данному заданию одинаковым образом были обработаны три заготовки из различных пород древесины:

- сосны, представляющей хвойные породы;
- березы, представляющей лиственные рассеянно-сосудистые породы;
- дуба, представляющего лиственные кольце-сосудистые породы.

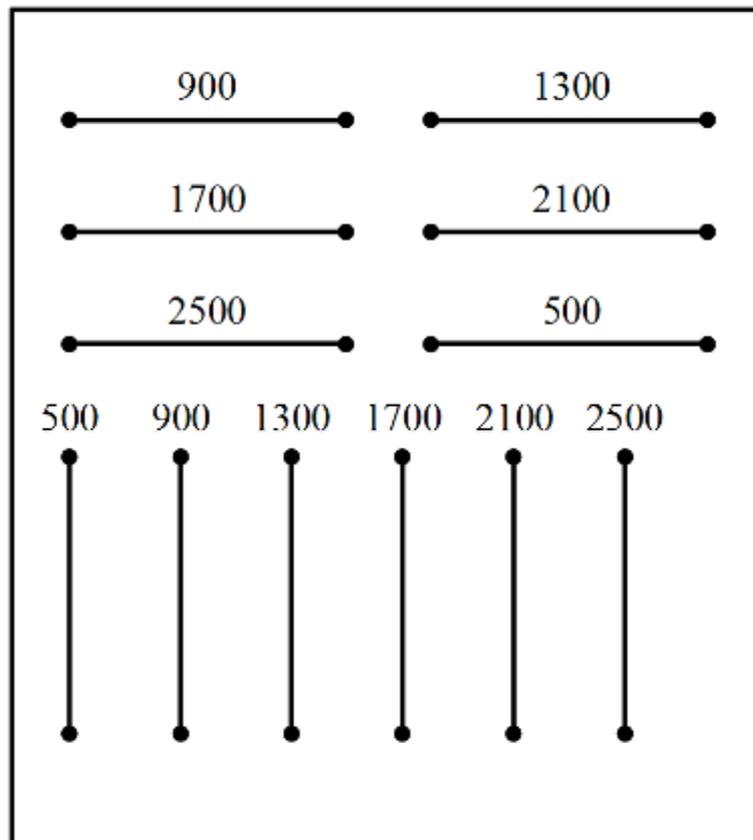


Рисунок 4.1 – Задание на фрезерование для станка с ЧПУ (указана скорость подачи в мм/мин)

Фреза имела диаметр 10 мм, высоту 11 мм, и формировала канавку треугольного сечения с углом между стенками канавки 90° . Верхняя граница фрезы в некоторых местах заготовки попадала ниже уровня поверхности, чтобы глубина канавки была не менее заданной независимо от неплоскостности поверхности заготовки, однако из-за этого могли формироваться дефекты на внешних краях канавки в виде недообработанных щеп (специально не удалены, рисунок 4.2). Интерес представляло качество обработки левой и правой (по отношению к направлению подачи фрезы) наклонных стенок канавки. Полукруглые начало и конец канавки (места заглабления и выглабления фрезы) также не

рассматриваются, из-за трудно-анализируемого характера взаимодействия фрезы с древесиной. Таким образом наблюдение и измерение шероховатости производили для боковых стенок канавки высотой около 10 мм и длиной около 50 мм. При этом одна стенка находилась в режиме встречного, а вторая – попутного фрезерования.

Для древесины сосны были сформированы по шесть канавок вдоль и поперек волокон (рисунок 4.2). Однако для древесины березы (рисунок 4.4) и дуба (рисунок 4.6) не удалось получить канавки с низкой скоростью подачи фрезы (500 мм/мин) из-за обугливания и начала горения вследствие выраженного трения между фрезой и древесиной.

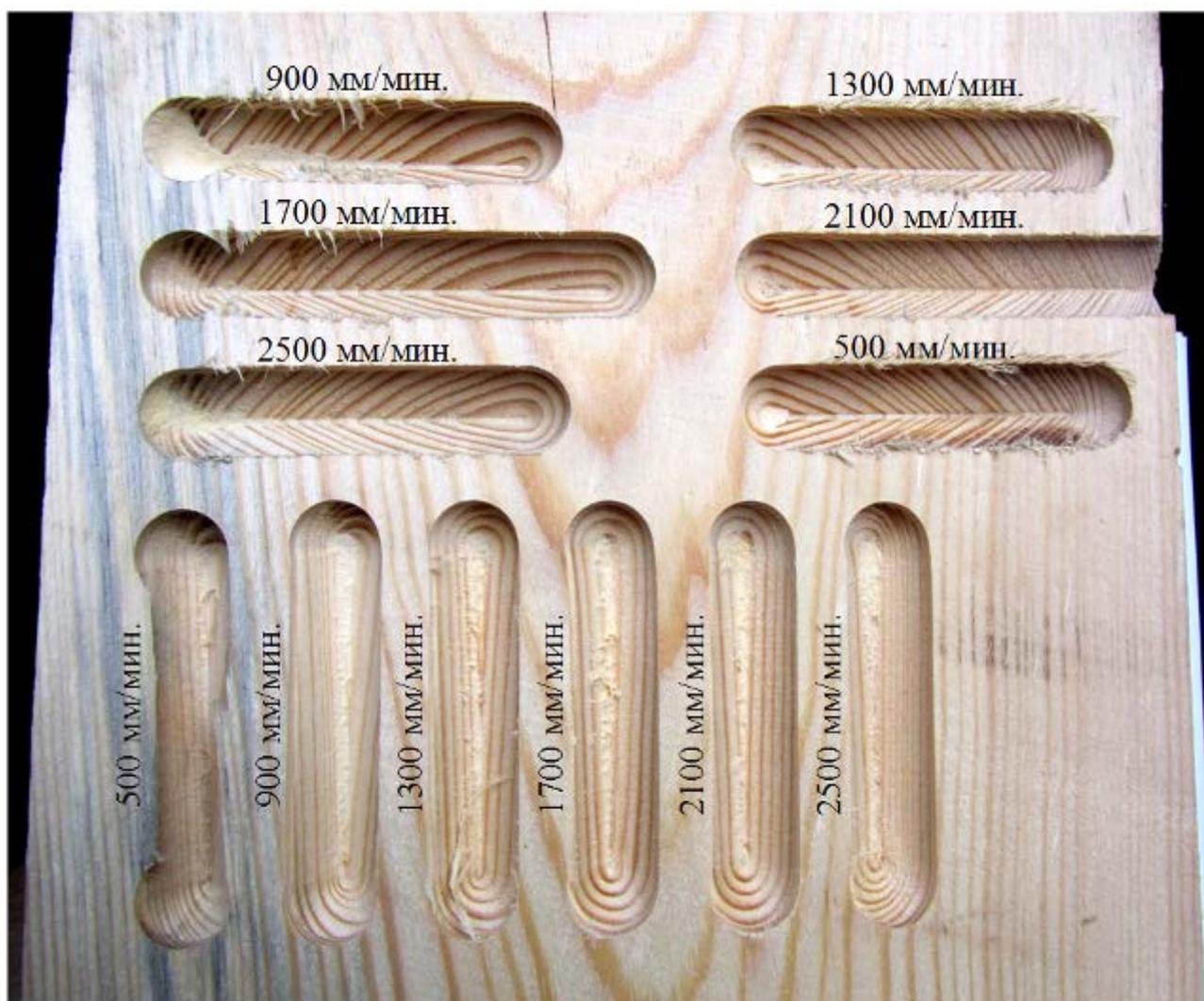


Рисунок 4.2 – Результат фрезерования поверхности сосны. Указана скорость подачи фрезы

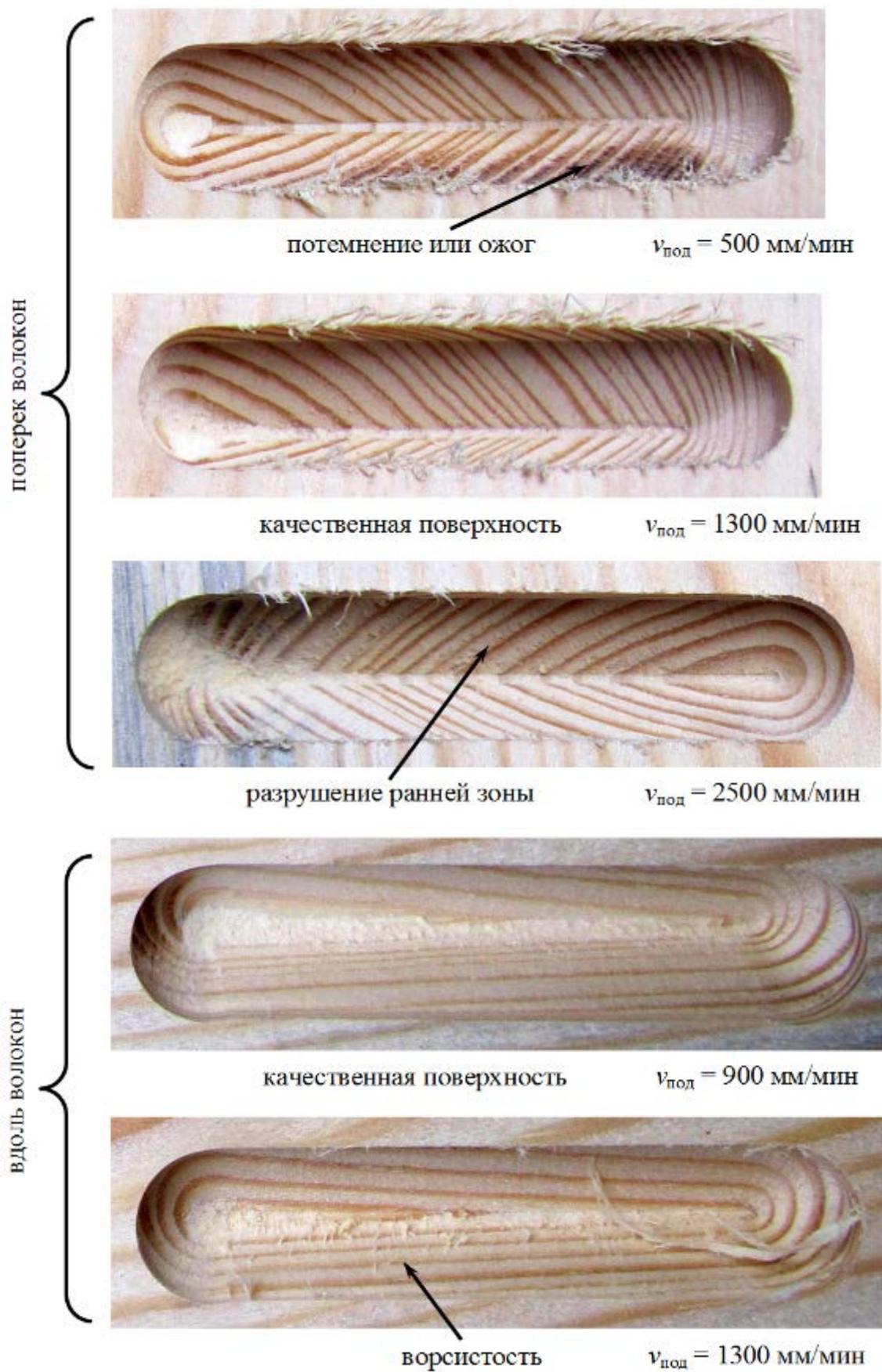


Рисунок 4.3 – Качественно обработанная поверхность и дефекты фрезерования древесины сосны поперек и вдоль волокон

В первую очередь был проведен визуальный анализ канавок на предмет поиска выраженных дефектов фрезерования. Для всех пород древесины при малой скорости подачи (500 мм/мин. для сосны и 900 мм/мин. для березы и дуба) и фрезеровании поперек волокон наблюдается потемнение или ожог стенок канавки (рисунки 4.3, 4.5, 47). Минимально возможная скорость подачи тем выше, чем выше твердость и модуль упругости древесины, так как данные параметры определяют силы сопротивления резанию и, соответственно, выделение энергии и нагрев в месте резания.



Рисунок 4.4 – Результат фрезерования поверхности древесины березы.
Указана скорость подачи фрезы

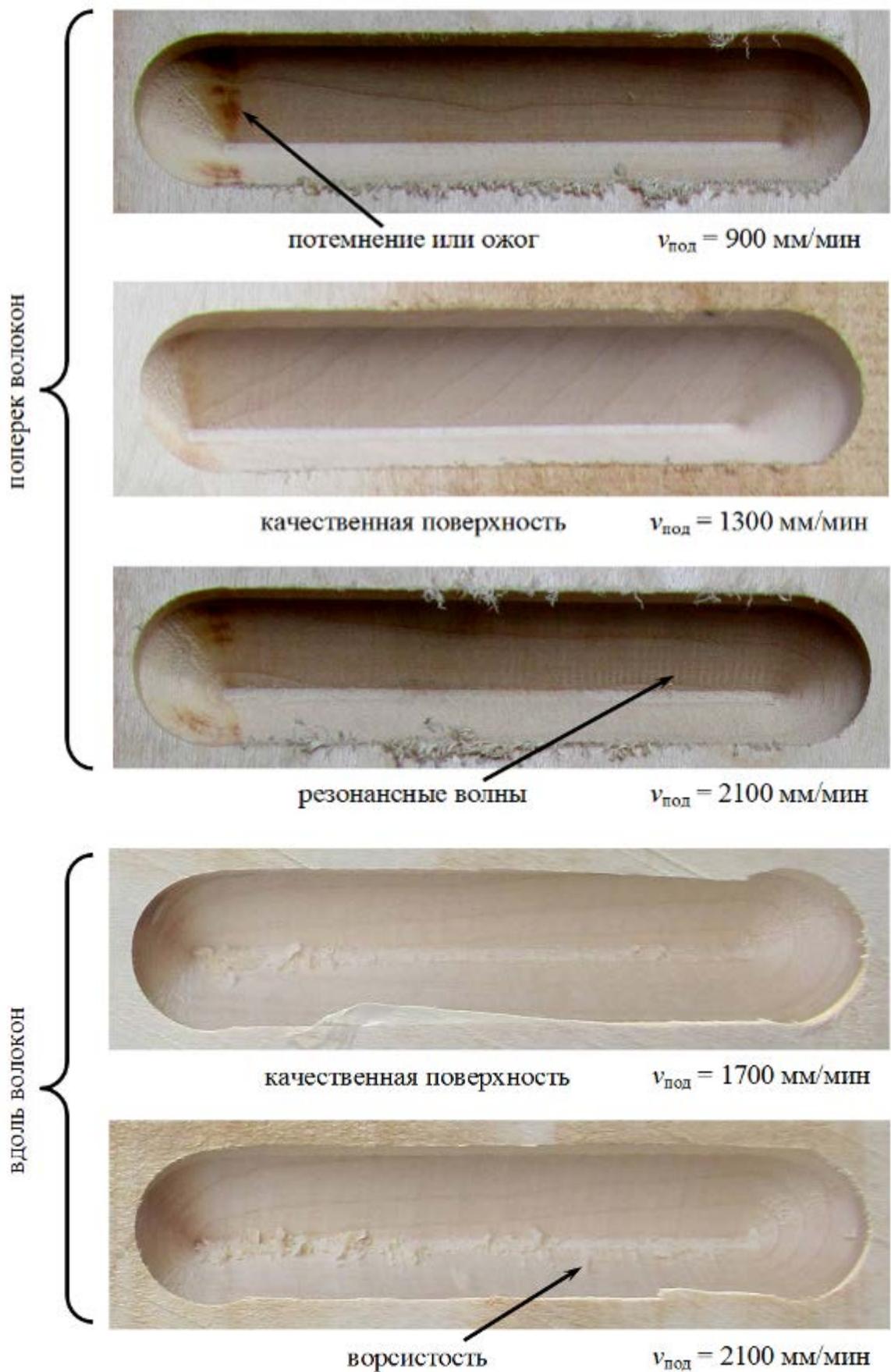


Рисунок 4.5 – Качественно обработанная поверхность и дефекты фрезерования древесины березы поперек и вдоль волокон

При слишком высокой скорости подачи (более 1700 мм/мин.) и фрезеровании поперек волокон наблюдаются другие дефекты поверхности, усложняющие ее последующую обработку. Для древесины сосны и дуба происходит существенное разрушение частей годовичных слоев с низкими механическими свойствами (рисунки 4.3, $v_{\text{под}} = 2500$ мм/мин. и 4.7, $v_{\text{под}} = 2100$ мм/мин.).



Рисунок 4.6 – Результат фрезерования поверхности древесины дуба.

Указана скорость подачи фрезы

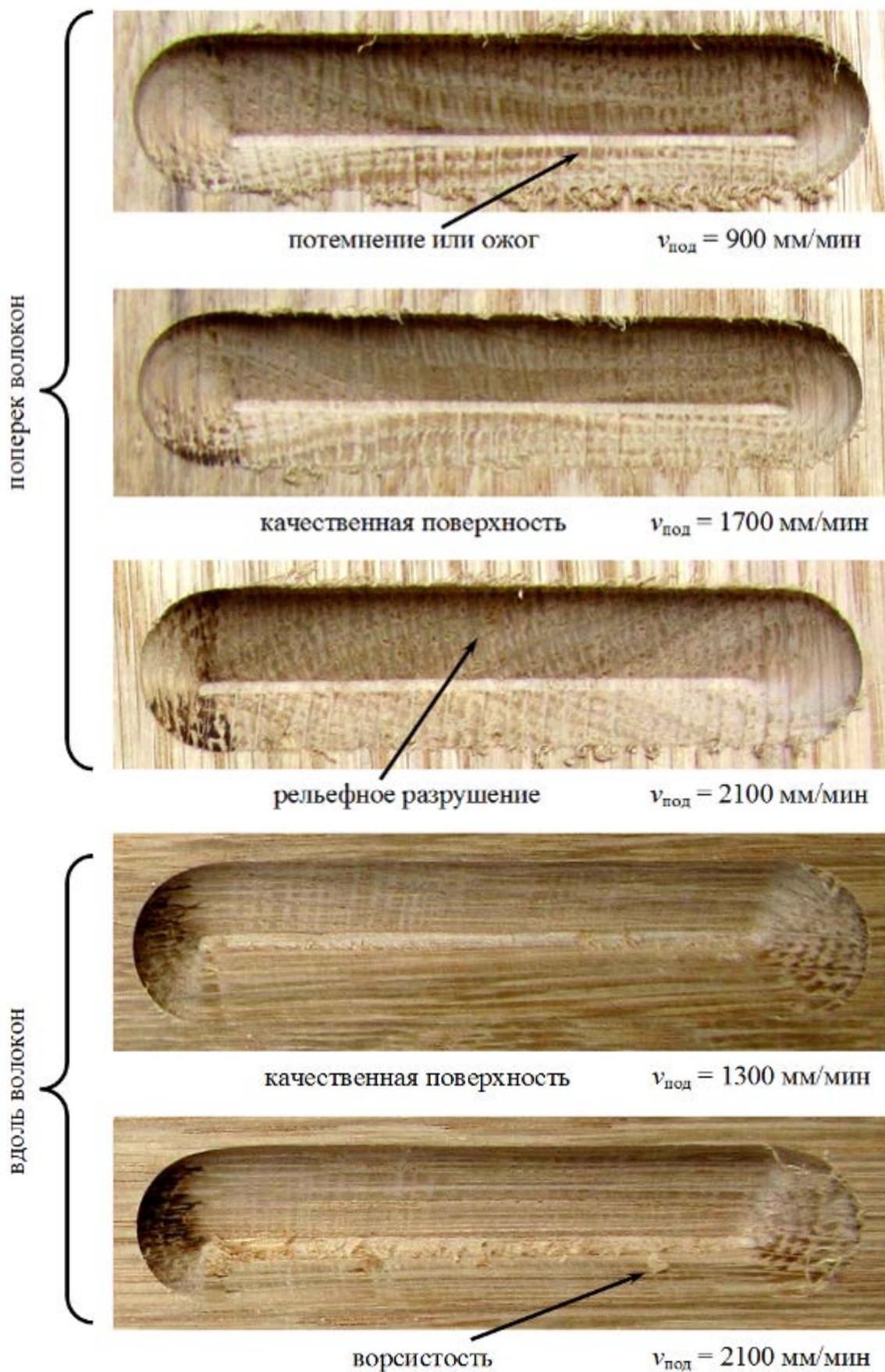


Рисунок 4.7 – Качественно обработанная поверхность и дефекты фрезерования древесины дуба поперек и вдоль волокон

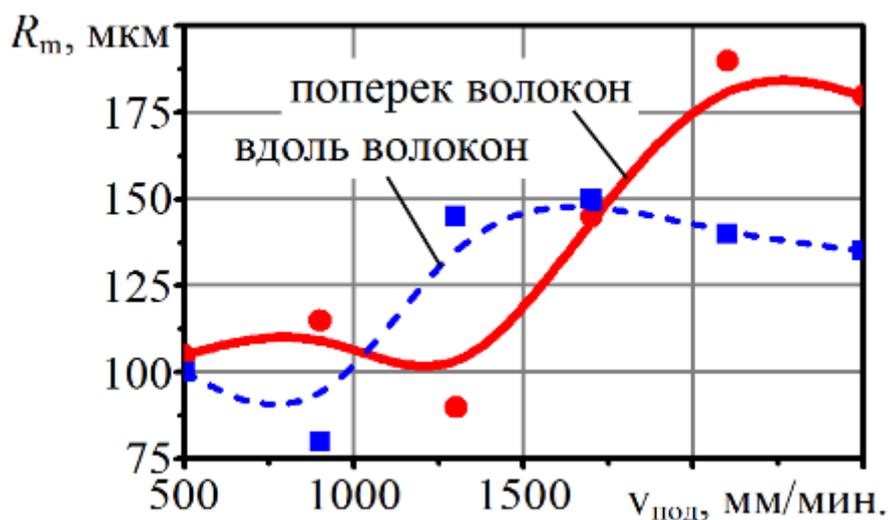
Для древесины же бука, в которой нет выраженных годовичных слоев, неравномерное разрушение годовичных слоев не наблюдается, однако при высоких скоростях подачи на поверхности образуются резонансные волны (рисунок 4.5, $v_{\text{под}} = 2100$ мм/мин.). Волнистость поверхности образуется из-за того, что при быстрой подаче фреза не успевает удалять поток древесины, в результате возникают большие силы сопротивления, перпендикулярные оси вращения фрезы, которые вызывают изгиб эффективной оси вращения фрезы в пределах, которые допускает жесткость фрезерного станка, как упругой системы. При достижении некоторого критического изгиба эффективная ось вращения фрезы выпрямляется и процесс изгиба повторяется снова, и т.д. В результате такого периодического колебания фрезы на древесине формируется волнистая поверхность.

При фрезеровании вдоль волокон низкие скорости подачи фрезы практически не приводят к обугливанню поверхности (рисунки 4.3, $v_{\text{под}} = 900$ мм/мин., 4.5, $v_{\text{под}} = 1700$ мм/мин. 4.7, $v_{\text{под}} = 1300$ мм/мин.), так как сопротивление фрезерованию вдоль волокон значительно ниже (до 20 раз), чем в поперечном направлении, из-за чего, соответственно, значительно меньше выделение тепла и нагрев. Поэтому использование низких скоростей подачи в продольном к волокнам направлении не приводит к образованию дефектов поверхности, однако нецелесообразно из-за низкой производительности.

При высокой скорости подачи вдоль волокон фреза "подрывает" годовичные слои, в результате чего формируется выраженная ворсистость, либо плоские недоотделенные стружки и соответствующие им обширные углубления в поверхности (рисунки 4.3, $v_{\text{под}} = 1300$ мм/мин., 4.5, $v_{\text{под}} = 2100$ мм/мин., 4.7, $v_{\text{под}} = 2100$ мм/мин.). В случае подачи фрезы по сложной траектории с малым радиусом скругления возможны сколы больших объемов древесины (рисунок 1.3). Дефекты перечисленных типов не просто приводят к увеличению шероховатости, а вообще не позволяют использовать величину шероховатости для характеристики неровностей поверхности. Такие разрушения поверхности требуют специальных операций по восстановлению поверхности (шпаклевка с по-

следующим шлифованием). Поэтому фрезерование вдоль волокон более чувствительно к повышению скорости подачи, чем поперек волокон. Анализ технологических режимов, используемых в промышленном фрезеровании высококачественной древесины кольце-сосудистых пород (например, дуба) вдоль волокон по прямым траекториям показал, что подача фрезы осуществляется с более высокой скоростью, чем в поперечном направлении. Однако в случаях криволинейной траектории или древесины с низкими механическими свойствами скорость подачи вдоль волокон должна быть меньше скорости подачи поперек волокон для исключения сколов или ворсистой поверхности.

Визуальный анализ поверхности подтверждается и результатами измерения шероховатости поверхности. На рисунках 4.8–4.10 приведены зависимости шероховатости поверхности R_m от скорости подачи $v_{\text{под}}$ вдоль и поперек волокон.



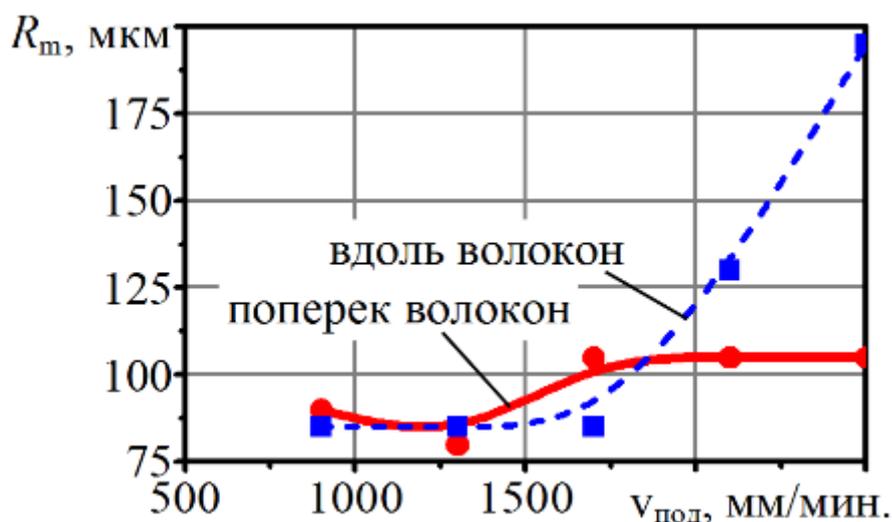
Точки – результаты эксперимента; сплошная линия – результаты моделирования

Рисунок 4.8 – Зависимость шероховатости R_a поверхности от скорости подачи $v_{\text{под}}$ для фрезерования древесины сосны поперек и вдоль волокон.

Для древесины сосны минимум шероховатости достигается при скорости подачи 900 мм/мин. в направлении вдоль волокон и 1300 мм/мин. в направле-

нии поперек волокон (рисунок 4.8). Таким образом, для обеспечения минимальной шероховатости, для древесины сосны скорость подачи вдоль волокон должна быть меньше скорости подачи поперек волокон.

При фрезеровании древесины березы можно использовать скорость подачи вдоль волокон до 1700 мм/мин., при этом шероховатость не превышает 100 мкм (рисунок 4.9, квадраты). Поперек же волокон можно подавать фрезу не быстрее 1300 мм/мин., так как при больших скоростях шероховатость поверхности превышает 100 мкм (рисунок 4.9, круги). Таким образом, для древесины рассеяно-сосудистых пород скорость подачи вдоль волокон должна быть выше, чем поперек волокон.

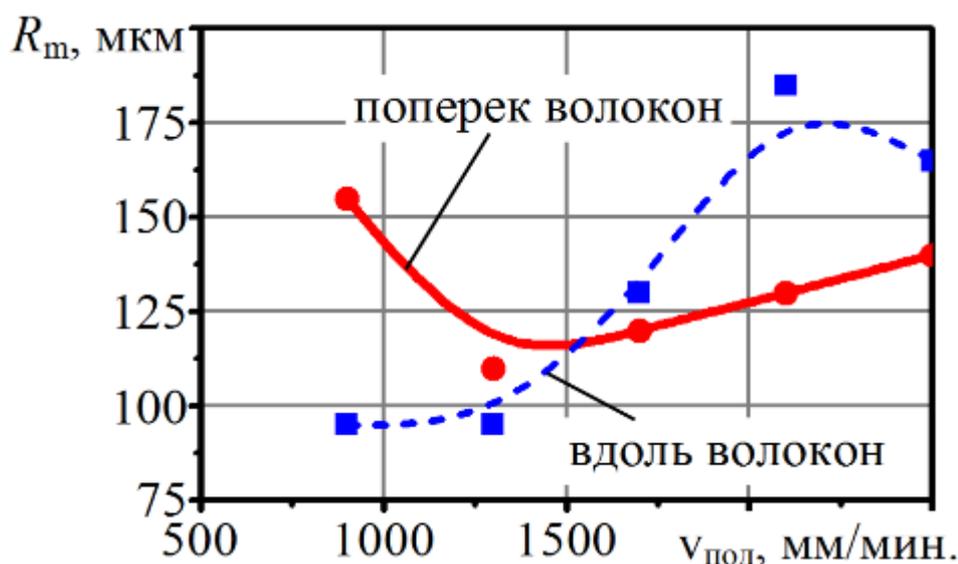


Точки – результаты эксперимента; сплошная линия – результаты моделирования

Рисунок 4.9 – Зависимость шероховатости R_a поверхности от скорости подачи $v_{\text{под}}$ для фрезерования древесины березы поперек и вдоль волокон.

При фрезеровании дуба минимальная шероховатость достигнута при скорости подачи 1300 мм/мин. как в продольном, так и поперечном к волокнам направлениях (рисунок 4.10). При фрезеровании вдоль волокон повышать скорость подачи свыше 1300 мм/мин. не целесообразно, так как шероховатость

резко увеличивается (рисунок 4.10, квадраты), кроме того, на фотографиях также видно отшелушивание годичных слоев (рисунок 4.6, $v_{\text{под}} = 1700$ мм/мин.). В то же время поперек волокон увеличение скорости подачи приводит лишь к слабому росту шероховатости (рисунок 4.10, круги), поэтому можно использовать скорость подачи 1700 мм/мин., выше скорости подачи вдоль волокон.



Точки – результаты эксперимента; сплошная линия – результаты моделирования

Рисунок 4.10 – Зависимость шероховатости R_a поверхности от скорости подачи $v_{\text{под}}$ для фрезерования древесины дуба поперек и вдоль волокон.

Таким образом, для кольце-сосудистых пород древесины скорость подачи вдоль волокон должна быть меньше скорости подачи поперек волокон.

Оптимальные скорости подачи, полученные на основе анализа экспериментальных данных, приведены в таблице 4.1.

Полученные значения оптимальных скоростей подачи не являются фундаментальными константами, и могут существенно отличаться для различных фрезерных станков, диаметра и конфигурации фрез, уровня заточки фрез, вариации параметров древесины. Так, в промышленных высокопроизводитель-

ных фрезерных станках используют скорости подачи до 8–10 м/мин, что в несколько раз выше скоростей подачи, используемых в представленном лабораторном эксперименте. Поэтому более фундаментальной величиной может быть отношение скоростей подачи вдоль и поперек волокон $\frac{v_{под}^0}{v_{под}^{90}}$ (таблица 4.1). Для кольце-сосудистых пород отношение меньше единицы, для рассеяно-сосудистых пород – больше единицы.

Таблица 4.1 – Оптимальные скорости подачи фрезы вдоль и поперек волокон

Порода древесины	Оптимальная скорость подачи вдоль волокон $v_{под}^0$, мм/мин	Оптимальная скорость подачи поперек волокон $v_{под}^{90}$, мм/мин	Оптимальное соотношение скоростей подачи вдоль и поперек волокон $\frac{v_{под}^0}{v_{под}^{90}}$
Сосна	900	1300	0,69
Береза	1700	1300	1,31
Дуб	1300	1700	0,76

На основе совокупности экспериментальных данных можно составить сводную таблицу дефектов и проблем фрезерования, подходящую в той или иной мере для всех пород древесины (таблица 4.2).

На рисунках 4.8–4.10 представлены также результаты моделирования сплошной и пунктирной линиями (соответственно поперек и вдоль волокон). Результаты эксперимента и моделирования различаются в среднем на 5–10 %. Различие может быть объяснено, с одной стороны, допущениями и упрощениями модели, с другой стороны, систематическими и случайными погрешностями эксперимента. Довольно хорошее совпадение модели и эксперимента позволяет использовать модель для выбора оптимальных технологических параметров во

многих сложных случаях фрезерования, когда экономически нецелесообразно проводить экспериментальную оптимизацию параметров.

Таблица 4.2 – Возможные дефекты фрезерования при отклонении от оптимальной скорости подачи

Скорость подачи	Типы дефектов при фрезеровании	
	поперек волокон	вдоль волокон
низкая (менее 900 мм/мин)	потемнение, ожог	низкая производительность
средняя (900–1700 мм/мин)	качественная обработка	качественная обработка
высокая (более 1700 мм/мин)	резонансные волны, разрушение ранних зон годичных слоев	ворсистость (отшелушивание годичных слоев)

Таким образом, установлены основные закономерности влияния макроструктуры древесины и технологических параметров процесса фрезерования на качество обрабатываемой поверхности и представлены рекомендации по выбору технологических параметров.

4.2 Оптимальная скорость подачи фрезы при произвольном угле между траекторией движения и направлением волокон

При движении фрезы по сложной траектории угол между касательной к траектории и направлением волокон φ постоянно изменяется. Для организации адаптивного фрезерования необходимо для каждого угла φ иметь возможность рассчитать оптимальную скорость подачи. Эксперименты проводились для двух значений угла: $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$. Но пользуясь геометрическими и физическими соображениями, можно интерполировать полученные данные и на промежуточные углы $0^\circ < \varphi < 90^\circ$. На основе полученных экспериментальных данных можно утверждать, что высокую точность описания будет иметь косинусоидальная зависимость $v_{\text{под}}(\varphi)$:

$$v_{под}(\varphi) = \frac{v_{под}^0 + v_{под}^{90}}{2} + \frac{v_{под}^0 - v_{под}^{90}}{2} \cos 2\varphi, \quad (4.1)$$

где $v_{под}$ – оптимальная скорость подачи фрезы; $v_{под}^0$ и $v_{под}^{90}$ – оптимальные скорости подачи фрезы вдоль волокон и поперек волокон, обеспечивающие наименьшие шероховатость и повреждения поверхности.

Графики зависимостей для исследованных пород древесины представлены на рисунке 4.11.

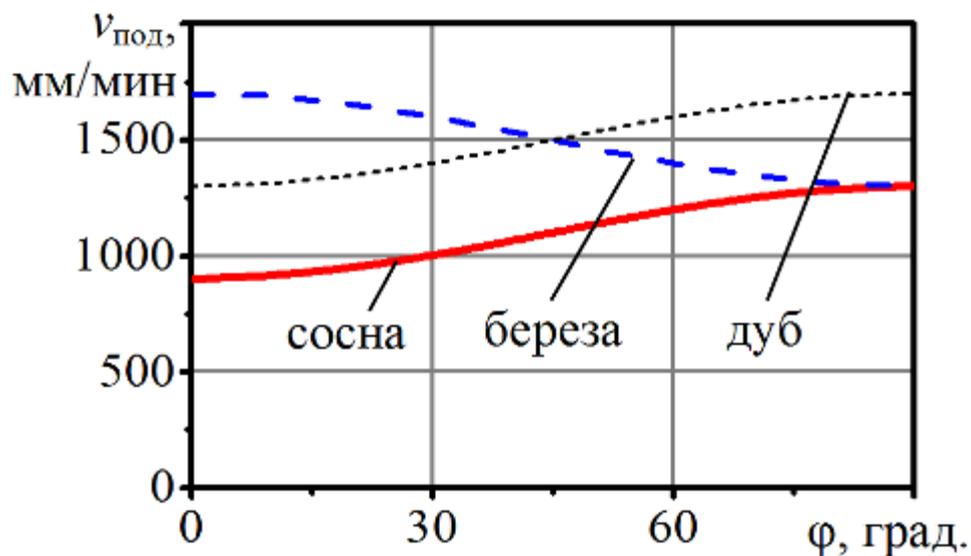


Рисунок 4.11 – Оптимальная скорость подачи $v_{под}$ в зависимости от угла между направлением подачи фрезы и волокнами древесины φ

Подстановка данных из таблицы 4.1 в формулу (4.1) позволяет выписать аналитические выражения, которые можно использовать в системе управления фрезерным станком для адаптивного фрезерования:

$$\text{для сосны: } v_{под}(\varphi) = 1100 - 400 \cos 2\varphi; \quad (4.2)$$

$$\text{для березы: } v_{под}(\varphi) = 1500 + 400 \cos 2\varphi; \quad (4.3)$$

$$\text{для дуба: } v_{\text{под}}(\varphi) = 1500 - 400 \cos 2\varphi. \quad (4.4)$$

При этом угол между направлением волокон и траекторией движения целесообразно определять с помощью предложенной в разделе 2 методики оптического распознавания структуры поверхности древесины.

4.3 Исследование целесообразности и эффективности адаптивного фрезерования

В данной серии экспериментов изучали эффективность фрезерования элементов декора с переменной скоростью подачи фрезы.

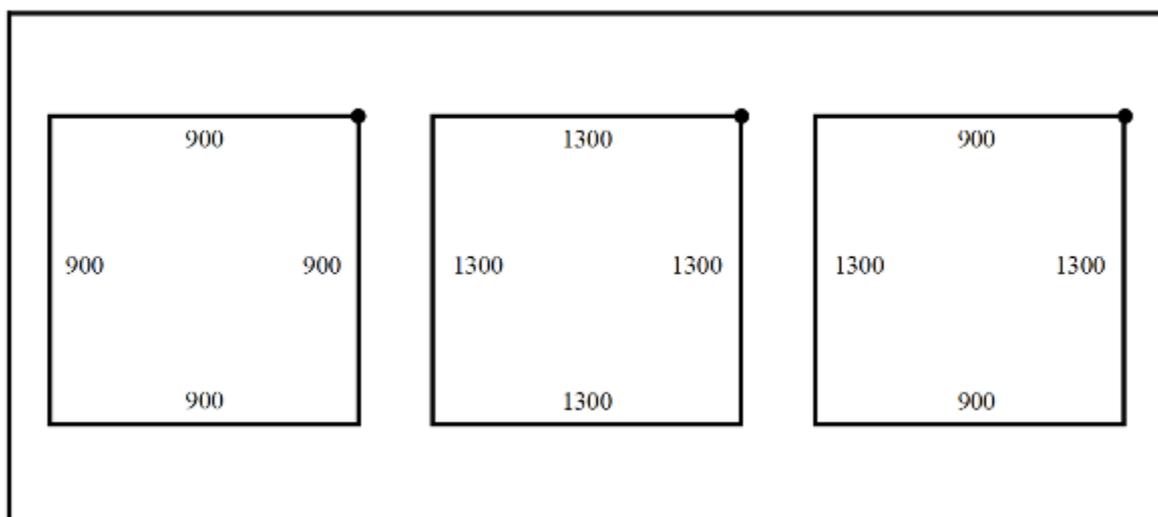


Рисунок 4.12 – Задание на фрезерование для станка с ЧПУ в эксперименте по изменению скорости подачи в зависимости от ориентации волокон (указана скорость подачи в мм/мин при фрезеровании поверхности древесины сосны)

На малых мебельных предприятиях возникают серьезные проблемы с фрезерованием декоративных элементов. При мелкосерийном и позаказном производстве нет возможности предварительно отработать технологические

режимы опытным путем. Поэтому обычно фрезерование производится с постоянными технологическими параметрами (скорость подачи, частота вращения фрезы), которые в целом обеспечивают приемлемую шероховатость поверхности, производительность, и довольно низкий процент брака. Однако из-за анизотропии структуры механические свойства, а, следовательно, и качество обработки поверхности, оказываются различными вдоль и поперек волокон. И в мелкосерийном производстве нет возможности экспериментальным путем подобрать алгоритм изменения технологических параметров в процессе декоративной обработки элемента мебели.

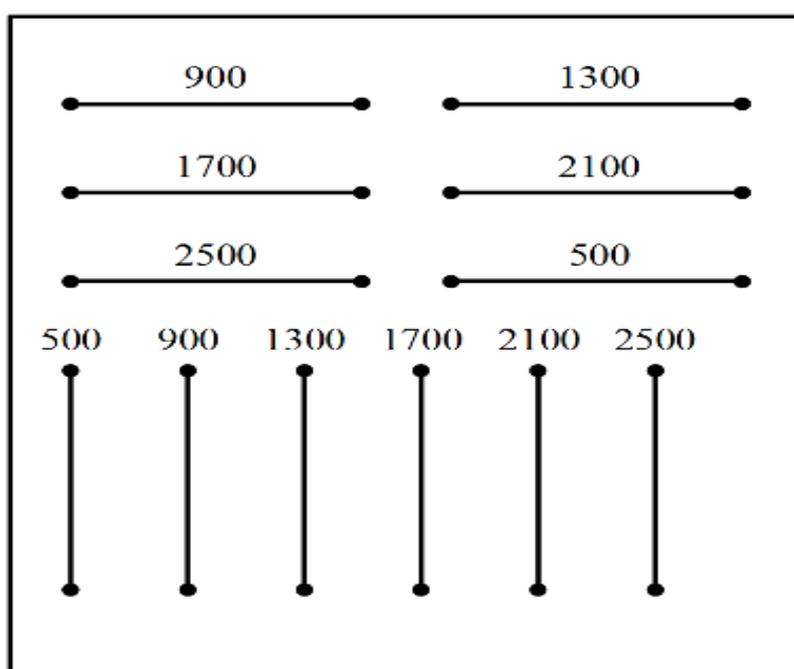


Рисунок 4.13 – Результат фрезерования поверхности древесины сосны.

Указана скорость подачи фрезы

При декоративном фрезеровании элементов мебели необходимо изменять технологические параметры по мере движения фрезы в зависимости от локальных особенностей формируемого декора и структуры материала. Проанализируем основные технологические параметры, условия их выбора, и их влияние на качество формируемой поверхности.

Фрезерование представляет собой частный случай обработки материалов резанием [70, 71]. Различают два основных вида фрезерования: тангенциальное и радиальное [45, 82]. При тангенциальном фрезеровании режущие лезвия вращающегося цилиндрического инструмента образуют обработанную поверхность параллельно оси его вращения. При радиальном фрезеровании лезвия вращающегося инструмента (фрезы) образуют обработанную поверхность перпендикулярно к оси его вращения. Наиболее распространенным режущим инструментом, применяемым для обработки на фрезерных станках с ЧПУ заготовок широкой номенклатуры, являются концевые фрезы [21]. При обработке тонких плоских заготовок используются праворежущие фрезы с левой спиралью и леворежущие с правой спиралью.

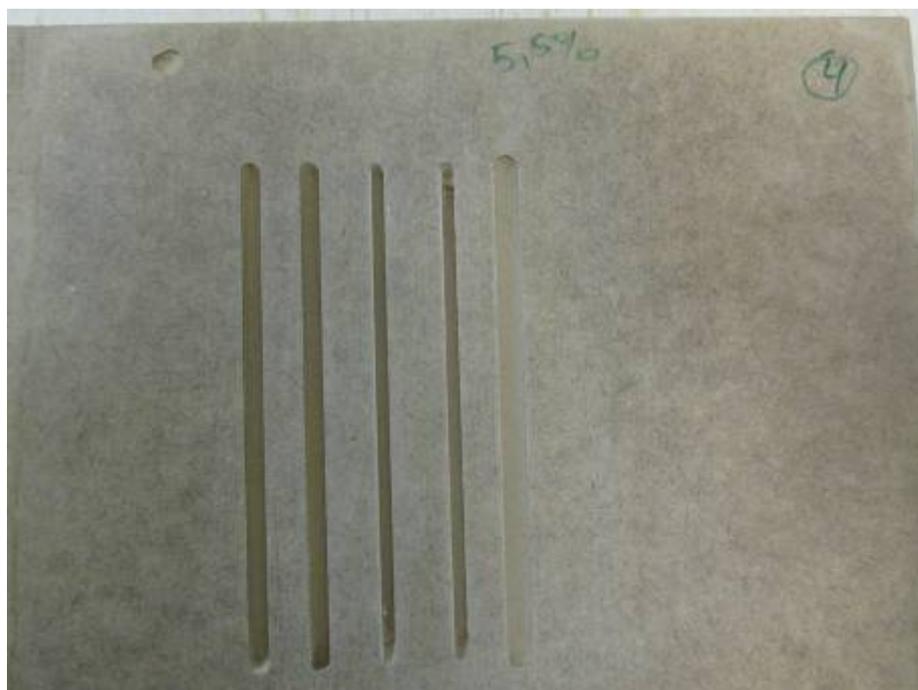


Рисунок 4.14 – Результат фрезерования поверхности древесины березы.
Указана скорость подачи фрезы

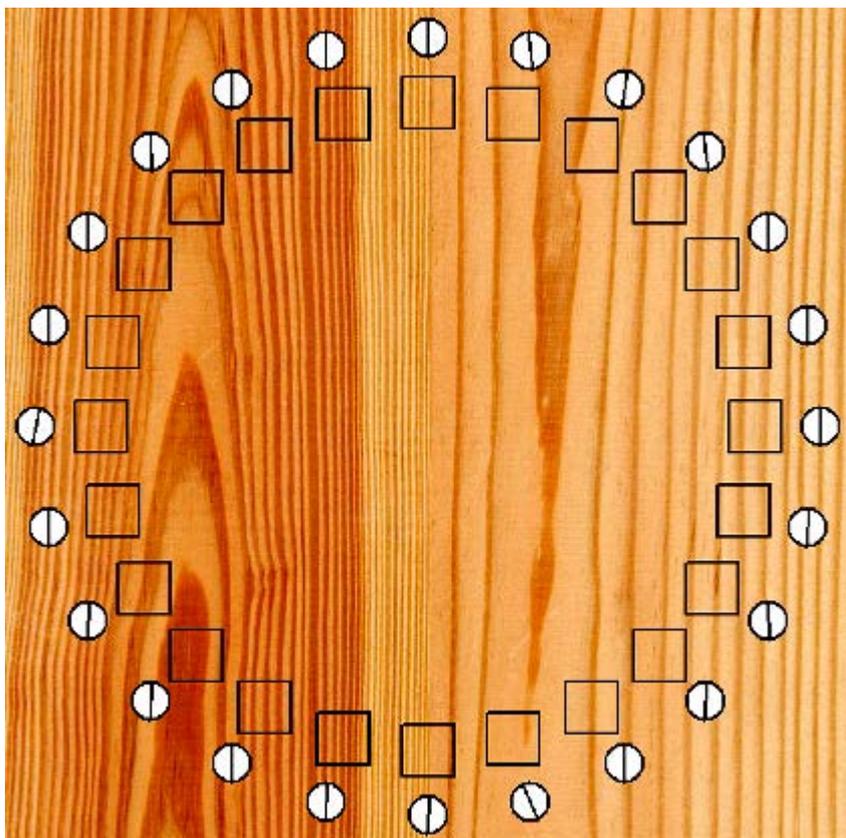


Рисунок 4.15 – Результат фрезерования поверхности древесины дуба.
Указана скорость подачи фрезы

Таблица 4.3 – Качество и производительность фрезерования при
использовании постоянной и переменной скоростей подачи
фрезы

Порода	Квадрат	Средняя шероховатость, мкм	Время фрезерования квадрата, с
Сосна	левый (900 мм/мин.)	88	31,9
	средний (1300 мм/мин.)	128	21,7
	правый (900 и 1300 мм/мин.)	92	25,8
Береза	левый (1300 мм/мин.)	97	20,4
	средний (1700 мм/мин.)	102	19,19
	правый (1300 и 1700 мм/мин.)	110	20,2
Дуб	левый (1300 мм/мин.)	112	17,8

	средний (1700 мм/мин.)	122	17,9
	правый (1300 и 1700 мм/мин.)	121	22,9

Анализируя полученные результаты можно сделать следующие выводы. Если производить фрезерование с заниженной скоростью подачи (левый квадрат), получаются высокие значения шероховатости (из-за участков, для которых такая скорость подачи не является оптимальной), и большое время обработки квадрата. Если производить фрезерование с завышенной скоростью подачи (средний квадрат), получаются высокие значения шероховатости (так же из-за участков, для которых такая скорость подачи не является оптимальной), однако положительным моментом является малое время обработки квадрата.

Наиболее оптимальным, с точки зрения снижения шероховатости, является вариант использования переменной скорости подачи в зависимости от направления волокон (правый квадрат). В этом случае шероховатость оказывается минимальной, в частности, при обработке сосны на 18–35 % меньше чем для случаев обработки с постоянной скоростью подачи. При этом время обработки квадрата остается довольно малым по сравнению со случаями постоянной скорости подачи. Более того, на производстве обычно используется заниженная скорость подачи, поэтому ускорение подачи на отдельных участках приводит к существенном росту производительности (в данном случае для сосны на 23 %).

Для березы и дуба использование переменной скорости подачи также приводит к снижению шероховатости, по сравнению с постоянной скоростью подачи, однако в меньшей степени (на 19 % и 5 % соответственно).

Необходимо отметить, что при таком фрезеровании с управлением скоростью подачи вдоль сложной траектории подачи фрезы удалось бы существенно понизить процент сколов (рисунок 1.4). Это позволило бы существенно снизить экономические затраты на дополнительные операции восстановления поверхности.

Таким образом, при декоративном фрезеровании древесины учет направления волокон позволяет снизить шероховатость, уменьшить время обработки

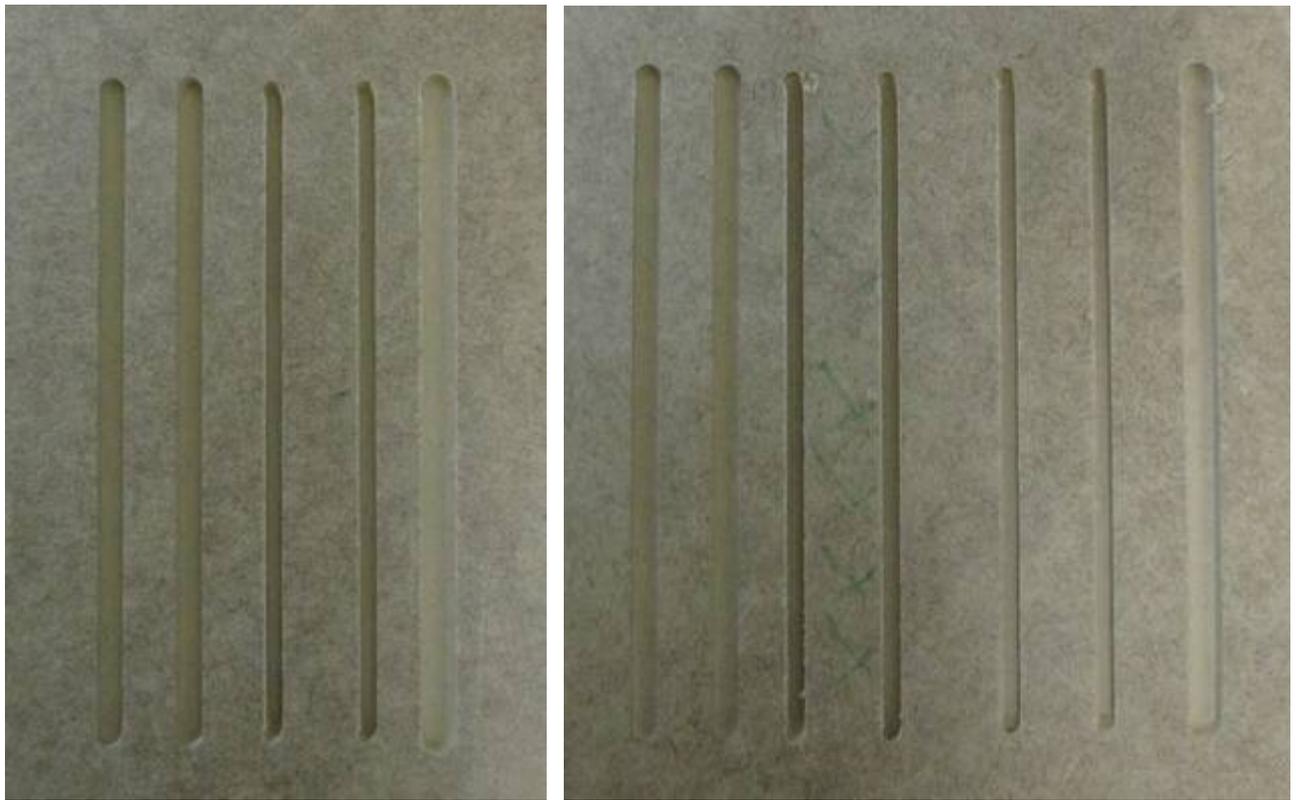
детали, а также уменьшить вероятность неприемлемых повреждений поверхности.

4.4 Оптимизация технологических параметров процесса фрезерования изотропного материала в зависимости от влажности поверхности

Как было показано выше, адаптивный подход позволяет существенно повысить производительность и качество фрезерования анизотропных материалов. Для изотропных же древесных материалов, в частности МДФ, также может быть применен адаптивный подход к декоративному фрезерованию. Во-первых, адаптивный подход позволяет согласовать технологические параметры между собой: например, при движении фрезы по сложной траектории может изменяться скорость подачи, при этом можно согласованно изменять частоту вращения фрезы для сохранения высокого качества обрабатываемой поверхности. Во-вторых, адаптивный подход позволяет выбирать рациональные технологические параметры в зависимости от внешних параметров, в частности, влажности материала. Даже незначительное изменение влажности поверхности МДФ приводит к необходимости существенно изменять технологические режимы фрезерования.

В этой связи проведено экспериментальное исследование, в котором согласованно изменяли упомянутые параметры: технологические (скорость подачи $v_{\text{под}}$, частота вращения ω фрезы, диаметр фрезы $d_{\text{ф}}$) и внешней среды (влажность поверхности материала f). Целью данного исследования был экспериментальный поиск аналитической зависимости между $v_{\text{под}}$, ω , $d_{\text{ф}}$ и f , которую можно будет использовать, как основу для адаптивного декоративного фрезерования МДФ.

В соответствии с матрицей планирования эксперимента проведены эксперименты по фрезерованию поверхности МДФ различной влажности фрезами различного диаметра. На рисунке 4.16 приведены для примера результаты фрезерования для случаев с наименьшей (5,0 %) и наибольшей (8,0 %) влажностью.



а

б

Рисунок 4.16 – Результаты фрезерования поверхности МДФ с влажностью 5 % (*а*) и 8 % (*б*)

Результаты измерений шероховатости представлены в таблице 4.4. На основе регрессионного анализа определены коэффициенты математических зависимостей показателей шероховатости R_a от скорости подачи $v_{\text{под}}$, скорости резания ω и влажности материала f . Коэффициенты математических моделей R_a представлены в таблице 4.5.

С использованием математических моделей вида уравнений регрессии можно аналитически рассчитать, например, показатель шероховатости R_a для диаметра фрезы 6 мм:

$$R_a = -143,7639821 + 0,049265 \cdot v_{\text{под}} - 0,0016585 \cdot \omega + 29,348719 \cdot f - 0,000000032 \cdot \omega^2 + 0,000003561 \cdot v_{\text{под}} \cdot \omega - 0,0516249 \cdot v_{\text{под}} \cdot f. \quad (4.5)$$

Таблица 4.4 – Результаты проведения активных экспериментов

Номер заготовки	Скорость подачи $v_{\text{под}}$, мм/мин	Скорость резания ω , об/мин	Влажность f , %	Диаметр фрезы, мм	Показатели шероховатости			Производительность P , сек
					R_{max} , мкм	R_z , мкм	R_a , мкм	
1	+1	+1	9,2	6	91,2	59,1	7,45	28
				4	113,4	62,3	11,831	
				8	66,0	67,90	9,832	
2	+1	-1	7,0	6	72,48	40,29	9,731	28
				4	63,20	56,18	10,827	
				8	68,30	55,18	8,739	
3	-1	+1	9,0	6	71,41	55,62	8,281	55
				4	82,50	45,13	9,21	
				8	88,62	54,99	11,19	
4	-1	-1	7,5	6	11,28	71,43	11,50	55
				4	66,78	56,82	8,219	
				8	72,71	61,19	9,821	
5	0	0	8,0	6	42,28	30,93	6,782	30
				4	64,34	59,98	8,398	
				8	81,54	55,78	10,982	
6	+1	0	6,5	6	72,44	67,82	11,283	28
				4	61,81	67,89	8,458	
				8	77,72	101,13	7,382	
7	0	-1	7,3	6	55,89	66,00	8,821	29
				4	63,49	99,23	7,210	
				8	102,88	30,56	9,821	
8	0	+1	6,8	6	56,33	69,56	6,821	30
				4	54,32	44,78	6,345	
				8	93,64	55,34	9,34	
9	0	0	8,8	6	71,82	67,89	14,17	30
				4	135,77	71,90	11,13	
				8	104,00	96,89	11,78	
10	0	0	7,9	6	90,21	60,67	78,66	29
				4	116,82	78,67	8,21	
				8	72,13	56,39	8,291	
11	0	0	7,3	6	89,88	45,89	12,28	30
				4	87,14	62,15	16,78	
				8	80,10	45,01	9,33	
12	0	0	8,5	6	40,40	33,94	3,78	30
				4	77,19	50,28	11,92	
				8	66,19	66,50	9,22	

Таблица 4.5 – Коэффициенты математических моделей R_a

Коэффициенты математической модели R_a	Фреза 4мм	Фреза 6мм	Фреза 8мм
a_0	6,1324946280	-150,436710668	120,41492471
$a_1 v_{\text{под}}$	0,0020543833	0,088958117	-0,07810575
$a_2 \omega$	0	-0,002559524	0,00494493
$a_3 f$	0	35,451658444	-30,89349121
$a_{11} v_{\text{под}}^2$	-0,0000007148	0	0,00000428
$a_{22} \omega^2$	-0,0000000672	-0,000000041	0
$a_{33} f^2$	-0,4274425571	0	1,00699017
$a_{12} v_{\text{под}} \omega$	0	0,000002634	-0,00000196
$a_{13} v_{\text{под}} f$	0	-0,022162427	0,01616237
$a_{23} \omega f$	0,0003727058	0	-0,00034707

Поставим задачу определить оптимальное значение скорости подачи $v_{\text{под}}$ и резания ω для заданной влажности f и диаметра фрезы $d_{\text{ф}}$. Составим систему дифференциальных уравнений и приравняем их к нулю следующим образом:

$$\frac{\partial R_a}{\partial v_{\text{под}}} = a_1 + 2a_{11}v_{\text{под}} + a_{12}\omega + a_{13}f = 0;$$

$$\frac{\partial R_a}{\partial \omega} = a_2 + 2a_{22}v_{\text{под}} + a_{12}v_{\text{под}} + a_{23}f = 0. \quad (4.6)$$

Значения оптимальной скорости подачи $v_{\text{под}}$ и резания ω для определенной влажности обрабатываемого материала представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Оптимальные значения скорости подачи и резания
инструмента в зависимости от влажности заготовки из МДФ

Влажность f , %	Фреза 4 мм		Фреза 6 мм		Фреза 8 мм	
	Скорость подачи $v_{\text{под}}$, м/мин	Скорость резания ω , м/с	Скорость подачи $v_{\text{под}}$, м/мин	Скорость резания ω , м/с	Скорость подачи $v_{\text{под}}$, м/мин	Скорость резания ω , м/с
5,0	1,434	2,903	1,230	2,605	1,283	3,572
5,1	1,434	2,960	1,256	2,869	1,302	3,885
5,2	1,434	3,019	1,282	3,133	1,319	4,198
5,3	1,434	3,077	1,308	3,398	1,337	4,511
5,4	1,434	3,135	1,335	3,662	1,354	4,823
5,5	1,434	3,193	1,361	3,926	1,372	5,137
5,6	1,434	3,251	1,387	4,190	1,39	5,449
5,7	1,434	3,309	1,413	4,455	1,407	5,762
5,8	1,434	3,367	1,439	4,719	1,425	6,075
5,9	1,434	3,425	1,466	4,980	1,442	6,388
6,0	1,434	3,483	1,492	5,247	1,46	6,701
6,1	1,434	3,541	1,518	5,511	1,478	7,014
6,2	1,434	3,599	1,544	5,776	1,496	7,327
6,3	1,434	3,657	1,571	6,040	1,513	7,639
6,4	1,434	3,715	1,597	6,304	1,531	7,952
6,5	1,434	3,773	1,623	6,568	1,549	8,265
6,6	1,434	3,831	1,649	6,832	1,567	8,578
6,7	1,434	3,889	1,675	7,097	1,584	8,891
6,8	1,434	3,947	1,702	7,361	1,602	9,204
6,9	1,434	4,005	1,727	7,625	1,62	9,517
7,0	1,434	4,064	1,754	7,889	1,638	9,829

Рассмотрим зависимость скорости подачи и резания от влажности материалов для фрез трех диаметров (рисунки 4.17, 4.18).

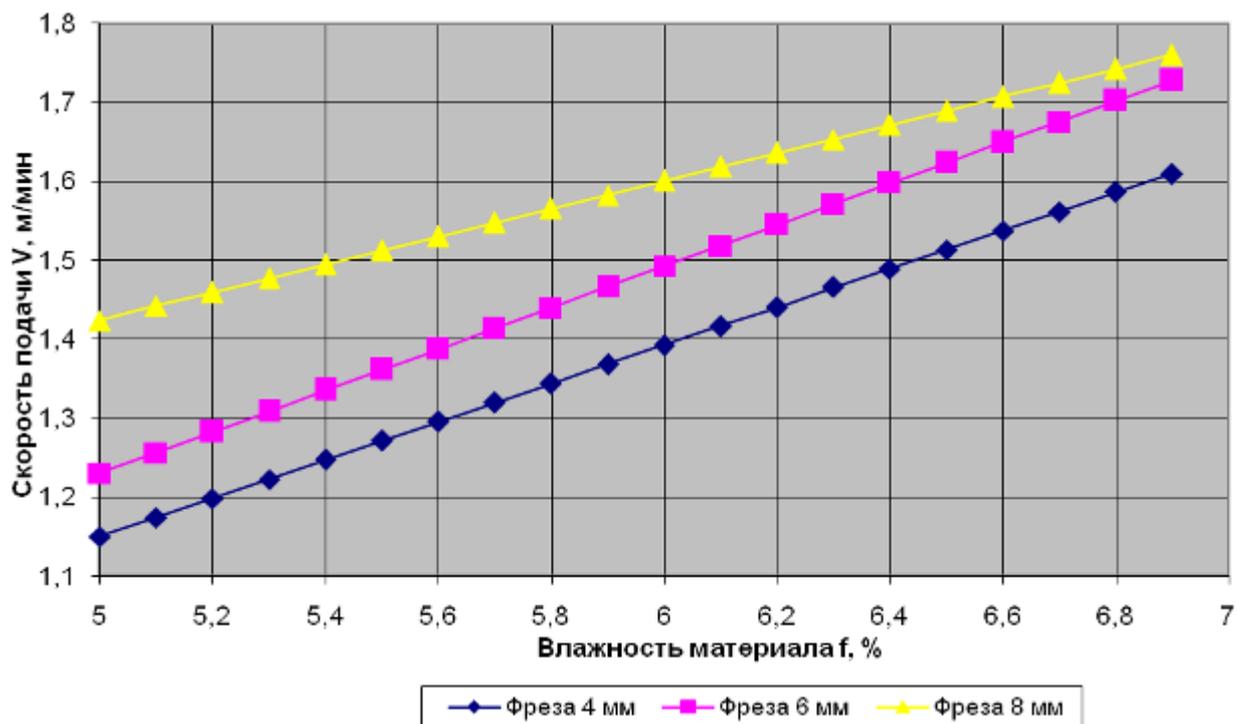


Рисунок 4.17 – Выбор скорости подачи в зависимости от влажности материала

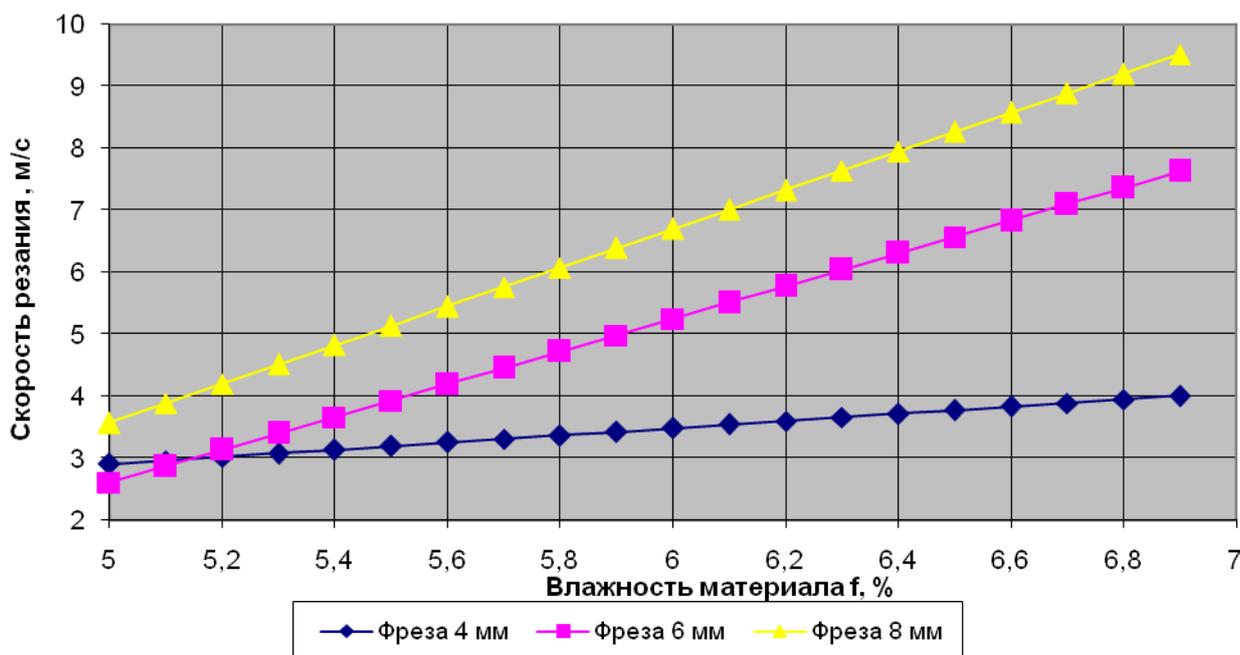
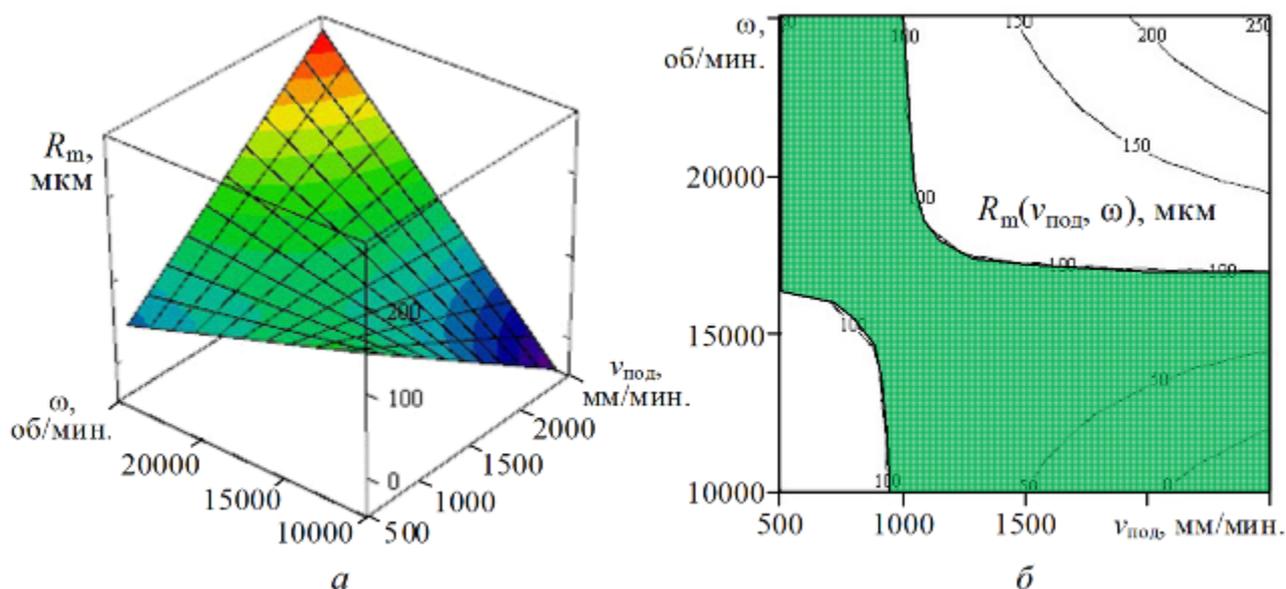


Рисунок 4.18 – Выбор скорости резания в зависимости от влажности материала

Как видно из приведенных графиков, при увеличении влажности МДФ необходимо увеличивать скорость подачи фрезы $v_{\text{под}}$ и скорость резания ω .

Полученные целевые функции позволяют быстро и безошибочно осуществлять выбор режимов фрезерной обработки исследуемых материалов и могут быть использованы при создании управляющей программы для станка с ЧПУ. На основе предложенных данных технолог может обоснованно задать оптимальные скорость резания и подачи инструмента.

На практике более удобны не аналитические выражения, а графики, картограммы или номограммы, по которым можно визуально или с помощью чертежных инструментов определить рациональные технологические параметры. С этой целью на основе полученного аналитического выражения для влажности 6 % построены поверхность отклика (рисунок 4.19, а) и картограмма для определения оптимальных параметров $v_{\text{под}}$ и ω (рисунок 4.19, б).



а – поверхность отклика; б – картограмма для быстрого выбора параметров (затемнена оптимальная область)

Рисунок 4.19 – Влияние технологических параметров на шероховатость поверхности при фрезеровании МДФ с влажностью 6 %

Картограмма представляет собой "вид сверху" на поверхность отклика, и содержит линии уровня функции $R_m(v_{\text{под}}, \omega)$ от 50 до 250 мкм с шагом 50 мкм. На картограмме затемнена область, соответствующая шероховатости поверхности после обработки менее 100 мкм. Точки, попадающие в затемненную область, соответствуют оптимальным технологическим параметрам. Анализ конфигурации оптимальной области позволяет сделать вывод, что минимальная шероховатость достигается либо при высокой частоте вращения фрезы (от 17 000 до 25 000 об./мин.) и малой скорости подачи (от 500 до 1000 мм/мин.), либо при низкой частоте вращения фрезы (от 10 000 до 17 000 об./мин.) и высокой скорости подачи (от 1000 до 2500 мм/мин.).

4.5 Выводы

1. Экспериментально изучены дефекты и шероховатость поверхности при фрезеровании с различной скоростью подачи трех разнотипных пород древесины в продольном и поперечном к волокнам направлениях. Составлена сводную таблицу дефектов и проблем фрезерования, позволяющая на производстве обоснованно выбирать технологические параметры.

2. Экспериментально установлено, что для обеспечения высокого качества поверхности при фрезеровании древесины сосны скорости подачи фрезы в направлении вдоль и поперек волокон должны соотноситься, как 0,69, березы – 1,31, дуба – 0,76. Предложена эмпирическая формула для определения оптимальной скорости подачи фрезы в произвольном направлении.

3. Предложено аналитическое выражение для определения оптимальной скорости подачи фрезы для произвольного угла между траекторией движения и направлением волокон. Получены коэффициенты выражения для древесины сосны, березы, дуба. Данное выражение может быть использовано в системах адаптивного управления декоративным фрезерованием.

4. Алгоритм адаптивного фрезерования древесины проверен на задаче фрезерования по квадратной траектории (ребра квадрата фрезеруются со скоро-

стью подачи, оптимальной для данной ориентации по отношению к волокнам древесины). При адаптивном фрезеровании удалось добиться минимальной шероховатости, не превышающей 100 мкм, на всех ребрах квадрата при сохранении высокой производительности процесса.

5. Экспериментально изучено влияние технологических параметров фрезерования (частота вращения фрезы, скорость резания, диаметр фрезы) МДФ с заданной влажностью на шероховатость поверхности. Получены аналитические выражения, связывающие технологические параметры с влажностью материала.

6. Получены таблица и построена картограмма для быстрого выбора оптимальных технологических параметров фрезерования МДФ с заданной влажностью поверхности в производственных условиях.

5 ВНЕДРЕНИЕ ПРЕДЛАГАЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ПРОИЗВОДСТВО И ОЦЕНКА ИХ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

5.1 Промышленная апробация и внедрение результатов работы

С целью повышения качества поверхности и износостойкости режущего инструмента при профильном фрезеровании мебельных щитов на ООО "МИГ-мебель" (г. Воронеж) были апробированы рациональные технологические режимы декоративного фрезерования (акт внедрения приведен в приложении В).

В работе использовали разработанную технологию изменения скорости подачи фрезы в зависимости от ориентации волокон древесины вблизи поверхности, позволяющую существенно повысить производительность и снизить первичную шероховатость фрезерованной поверхности мебельных щитов. Промышленная апробация результатов работы проводилась на обрабатывающем центре "ROVER 22" с программным управлением.

Для определения шероховатости фрезерованной поверхности мебельных щитов использовался прибор "Спектроник 10" с погрешностью не более 5%.

В результате использования предлагаемой технологии, повышается производительность технологического процесса в среднем на 14 %. Шероховатость R_m всех обработанных образцов не превышала значения 100 ± 15 мкм. При этом величина шероховатости R_m при обработке фрезерным инструментом в технологическом процессе с постоянной скоростью подачи достигает 150–200 мкм в определенных ориентациях волокон древесины.

Также, оценочные производственные испытания проведены на ОАО "Графское".

Таким образом, решена задача разработки технологии декоративного фрезерования мебельных щитов, позволяющая повысить производительность и улучшить изначальное качество обрабатываемых поверхностей.

5.2 Техничко-экономическая эффективность процесса фрезерования с учетом макроструктуры поверхности

Внедрение адаптивного фрезерования позволяет получить экономический эффект по двум направлениям. Во-первых, при изменении скорости подачи фрезы в зависимости от локальной структуры поверхности обеспечивается низкая шероховатость (в идеальных условиях – минимально возможная для данной ориентации волокон), что упрощает на 10–30 % дальнейшую операцию шлифования. Во-вторых, повышается производительность станка за счет того, что определенные участки линии фрезерования проходятся с большей скоростью подачи, а не с гарантированно заниженной постоянной скоростью. В третьих, уменьшается вероятность сколов и других недопустимых повреждений поверхности. Таким образом, годовой экономический эффект на предприятии складывается из эффекта снижения затрат на шлифование, повышения производительности, уменьшения брака.



Рисунок 5.1 – Составляющие экономического эффекта от внедрения предлагаемой технологии

5.2.1 Затраты на шлифование обработанной фрезерованием поверхности

Годовой экономический эффект от снижения затрат на шлифование $\mathcal{E}_{\text{ш}}$

определяется по формуле.

$$\mathcal{E}_{ш} = \mathcal{Z}_{ш} - \mathcal{Z}_{шп}, \quad (5.1)$$

где $\mathcal{Z}_{ш}$ и $\mathcal{Z}_{шп}$ – затраты на шлифование обработанной фрезерованием поверхности до и после внедрения результатов диссертационной работы.

$$\mathcal{Z}_{ш} = \mathcal{Z}_{ш.м.} + \mathcal{Z}_{з/п.ш}, \quad (5.2)$$

где $\mathcal{Z}_{ш.м.}$ – затраты на шлифовальные материалы.

$\mathcal{Z}_{з/п.ш}$ – затраты на заработную плату рабочих-шлифовщиков.

5.2.1.1 Определение затрат на расходные материалы (шлифовальные материалы)

Шлифование после обработки фрезерованием проходит в четыре этапа с использованием разных номеров шлифшкурки:

- 1-й проход: №20 или №16;
- 2-й проход: №12 или №10;
- 3-й проход: №8 или №6;
- 4-й проход: №0.

Внедрение технологии адаптивного декоративного фрезерования позволяет уменьшить шероховатость поверхности и сократить первый этап шлифования. Оценка в ходе производственных испытаний показала, что трудоемкость операций шлифования сокращается ориентировочно на 10 %. Это означает, что расход шлифовальных материалов может быть меньше на 10 % по сравнению с текущим, а также на 10 % может быть сокращена оплата труда шлифовальщиков. Сначала рассчитаем полные затраты на шлифовальные материалы и на оплату труда шлифовальщиков.

$$\mathcal{Z}_{ш.м.} = N_p \sum_{n=1}^4 \mathcal{Z}_n, \quad (5.3)$$

где N_p – количество рабочих-шлифовщиков (для определенности на среднем мебельном предприятии $N_p = 4$);

Z_n – затраты на шлифшкурки разных номеров ($n = 1 \dots 4$).

Затраты на шлифовальные материалы определяются по формуле:

$$Z_n = S \cdot P_n \cdot C_n, \text{ руб.}, \quad (5.4)$$

где P_n – расход шлифовальных материалов на 1 м^2 шлифуемой поверхности, м^2 ($P_1 = 0,06 \text{ м}^2$, $P_2 = 0,05 \text{ м}^2$, $P_3 = 0,038 \text{ м}^2$, $P_4 = 0,028 \text{ м}^2$);

C_n – стоимость 1 м^2 шлифовальных материалов, руб. ($C_1 = 132 \text{ руб/м}^2$, $C_2 = 131,64 \text{ руб/м}^2$, $C_3 = 131,64 \text{ руб/м}^2$, $C_4 = 145,12 \text{ руб/м}^2$);

S – площадь обрабатываемой поверхности, м^2 ,

$$S = \frac{T \cdot t \cdot 60}{t_{ш}} b, \text{ м}^2, \quad (5.5)$$

где $t_{ш}$ - время, затрачиваемое на шлифование 1 погонного метра шлифуемой поверхности, мин;

$$t_{ш} = 5 \text{ мин.};$$

b - максимальная ширина шлифуемой поверхности, м ($b = 0,05 \text{ м}$).

$$S = (248 \times 8 \times 60 \times 0,2) \times 0,05 = 1190,4 \text{ м}^2.$$

$$Z_1 = 1190,4 \times 0,06 \times 132 = 9427,97 \text{ руб.}$$

$$Z_2 = 1190,4 \times 0,05 \times 131,64 = 7835,13 \text{ руб.}$$

$$Z_3 = 1190,4 \times 0,038 \times 131,64 = 5954,76 \text{ руб.}$$

$$Z_4 = 1190,4 \times 0,028 \times 145,12 = 4837,02 \text{ руб.}$$

$$Z_{ш.м.} = 4 \times (9427,97 + 7835,13 + 5954,76 + 4837,02) = 112\,220 \text{ руб.}$$

5.2.1.2 Расчет расходов на заработную плату рабочего-шлифовщика

$$Z_{z/n.u} = P_{z/n} \cdot N_p, \text{ руб.}, \quad (5.6)$$

где $P_{z/n}$ - заработная плата рабочего-шлифовщика за год, руб. ($P_{z/n} = 20\,000 \times 12 = 240\,000$ руб.).

$$Z_{z/n.u} = 240\,000 \times 4 = 960\,000 \text{ руб.}$$

$$Z_u = 112\,220 + 960\,000 = 1\,072\,200 \text{ руб.}$$

Так как предлагаемая технология позволяет снизить затраты на 10 %, получаем затраты после внедрения:

$$Z_{\text{шт}} = 0,9 \cdot 1\,072\,200 = 964\,980 \text{ руб.}$$

Годовой экономический эффект составляет:

$$\mathcal{E}_{\text{шт}} = 1\,072\,200 - 964\,980 = 107\,220 \approx 110\,000 \text{ руб.} \quad (5.7)$$

5.2.2 Экономический эффект от повышения производительности оборудования при использовании адаптивного фрезерования

Экономический эффект \mathcal{E}_n от повышения производительности рассчитывается через прирост чистой продукции за фиксированный период времени:

$$\mathcal{E}_n = \Phi R (T_2 - T_1), \quad (5.8)$$

где Φ – стоимость основных фондов, оборудования; R – коэффициент рентабельности; T_1 , T_2 – время работы оборудования до и после внедрения новой технологии.

Оценка по результатам производственных испытаний годового эффекта от повышения производительности для среднего мебельного предприятия составляет около 100 000 руб.

5.2.3 Экономический эффект от уменьшения затрат на операции восстановления поверхности

По оценкам главного технолога воронежского мебельного предприятия *N* (название не указывается для исключения имиджевых рисков) на этапе фрезерования около 10 % деталей получают недопустимые повреждения поверхности. При месячном объеме производства данного предприятия 8000 элементов мебели около 800 элементов в месяц требуют дополнительных технологических операций восстановления поверхности. Эти операции влекут необходимость поддержания одного-двух дополнительных рабочих мест, а также затрат на расходные материалы и оборудование и последующую дополнительную операцию шлифования.

С помощью предлагаемой адаптивной технологии количество сколов и недопустимых повреждений поверхности уменьшается более чем в 2 раза, поэтому затраты при перерасчете на 20000 элементов мебели в год уменьшаются ориентировочно на 210 000 рублей (оценка по результатам производственных испытаний).

5.2.4 Общий экономический эффект

При сложении определенных ранее экономических эффектов от снижения затрат на операции шлифования, от повышения производительности и уменьшения затрат на операции восстановления поверхности, общий экономический эффект составит

$$Э_{\text{общ}} = 107\,000 + 100\,000 + 210\,000 \approx 420\,000 \text{ руб.}$$

Таким образом, для среднего мебельного предприятия (объем производства 20000 мебельных элементов в год) внедрение предлагаемой технологии адаптивного декоративного фрезерования позволит получить годовой экономический эффект 420 000 рублей. При этом срок окупаемости капитальных вложений (около 100 000 рублей) составляет около 3 месяцев. Капитальные вложения необходимы на оснащение фрезерного станка видеокамерой и корректировки управляющего алгоритма.

5.3 Выводы

1. С целью повышения производительности и качества поверхности при декоративном фрезеровании древесных мебельных щитов на ООО "МИГмебель" и "ОАО Графское" были произведены производственные испытания предлагаемых технологических режимов с переменной скоростью подачи фрезы в зависимости от структуры поверхности.

2. Использование предлагаемых технологических решений в производственных условиях позволило уменьшать количество сколов в 2,3 раза, повысить производительность процесса для древесины сосны на 23 %, березы – на 16 %, дуба – на 16 %, а также на уменьшить затраты на последующее шлифование на 10 %.

3. Расчетный годовой экономический эффект внедрения разработанной технологии в производство составляет 420000 рублей (при объеме производства 20000 мебельных элементов в год); срок окупаемости капитальных вложений составляет 3 месяца.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Существующие технологии фрезерования декоративных элементов не учитывают локальные особенности макроструктуры древесины, поэтому не позволяют достигнуть высокой производительности и качества обработки поверхности, особенно при фрезеровании высокохудожественных изделий, мелкосерийном или позаказном производстве, для низкосортной древесины.

2. Разработана физико-математическая модель фрезерования древесины, учитывающая структуру поверхностного слоя, позволяющая подобрать рациональные параметры процесса фрезерования, обеспечивающие высокие производительность и качество обработки поверхности.

3. Установлено, что при углах ориентации годичных слоев к направлению подачи фрезы $0...45^{\circ}$ образуются различные дефекты поверхности, сопровождающиеся высокой шероховатостью и сколами.

4. Установлены резонансные явления в упругой системе станок–фреза–древесина, влияющие на дефекты и шероховатость поверхности. Учет явлений резонанса позволяет повысить скорость подачи фрезы на 50–70 % (для сосны с 600 до 900–1100 мм/мин, березы с 900 до 1500 мм/мин., дуба с 800 до 1300 мм/мин.) за счет смещения из дорезонансного в первый антирезонансный диапазон.

5. Разработан математический аппарат, позволяющий определять направление волокон в обрабатываемом участке по оптическому изображению поверхности древесины, основанный на дискретном преобразовании Фурье.

6. Предложена технология адаптивного декоративного фрезерования, заключающаяся в регулировании скорости подачи фрезы в зависимости от угла между направлением движения фрезы и направлением волокон на поверхности в месте фрезерования, определяемым по оптическому изображению фрезеруемой поверхности.

7. Экспериментально установлено, что для обеспечения высокого качества поверхности при фрезеровании древесины сосны скорости подачи фрезы в

направлении вдоль и поперек волокон должны соотноситься, как 0,69, березы – 1,31, дуба – 0,76. Предложена эмпирическая формула для определения оптимальной скорости подачи фрезы в произвольном направлении.

8. Установлено, что при использовании адаптивного фрезерования уменьшается количество сколов в 2,3 раза, повышается производительность процесса для древесины сосны на 23 %, березы – на 16 %, дуба – на 16 %, а также на уменьшаются затраты на последующее шлифование на 10 %.

9. Разработаны рекомендации и реализованы технологические решения в производственных условиях (ООО "МИГМебель", г. Воронеж), позволившие повысить производительность профильного фрезерования на 16 %, снизить на 10 % экономические затраты на последующее шлифование поверхности, уменьшить количество сколов в 2,3 раза. Расчетный годовой экономический эффект внедрения разработанной технологии в производство составляет 420000 рублей (при объеме производства 20000 высокохудожественных мебельных элементов в год); срок окупаемости капитальных вложений составляет 3 месяца.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Allen, M. P. Computer Simulation of Liquids [Текст] / M. P. Allen, D. J. Tildesley – Oxford : Clarendon Press, 1987. – 408 p.
2. Hafner, J. Atomic-Scale Computation Materials Science [Текст] / J. Hafner // Acta Mater. – 2000. – Vol. 48. – P. 71–92.
3. Hoover, W. G. Atomistic Nonequilibrium Computer Simulations [Текст] / W. G. Hoover // Physica A. – 1983. – Vol. 118. – P. 111–122.
4. Mohammed, Haider A. Abbass. Evolution of Information Technology as a Discipline [Электронный ресурс] / Haider A. Abbass Mohammed // The Fifth Congress of "Scientific Research Outlook in the Arab World". – Fez (Morocco), 2008. – Режим доступа: <http://www.astf.net/en/scientific-research-outlook/77-scientific-research-outlook-2008->.
5. Monaghan, J. Smoothed Particle Hydrodynamics [Текст] / J. Monaghan // Annu. Rev. Astron. Astrophys. – 1992. – Vol. 30. – P. 543–574.
6. Panshin, A. J. Textbook of Wood Technology [Текст] / A. J. Panshin, C. de Zeeuw. – New York : McGraw-Hill, 1970. – Vol. 1. – 705 p.
7. SamSim [Электронный ресурс] // Программа для моделирования систем автоматического управления. – Режим доступа: <http://www.samsim2002.narod.ru/SamSim.html>. – Загл. с экрана.
8. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский – М. : Наука, 1976. – 279 с.
9. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя [Текст] : в 3 т. / В. И. Анурьев – 8-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2001 г. – 864 с.
10. Артемов, В. П. Исследование процессов прессования изделий из шпона в жестких пресс-формах [Текст] : автореф. ... канд. техн. наук / В. П. Артемов. – Минск : БТИ, 1970. – 26 с.
11. Барташевич, А. А. История интерьера и мебели [Текст] / А. А. Барта-

шевич, Н. И. Аладова, А. М. Романовский. – М. : Феникс, 2004 г. – 95 с.

12. Барташевич, А. А. Технология производства мебели и резьба по дереву [Текст] / А. А. Барташевич, В. П. Антонов. – М. : Высшая школа, 2001. – 287 с.

13. Белянкин, Ф. П. Деформативность и сопротивляемость древесины как упруго-вязко-пластического тела [Текст] / Ф. П. Белянкин, В. Ф. Яценко. – Киев : АН УССР, 1957. – 381 с.

14. Борисов, А. Н. Концепция устойчивого развития мебельных предприятий [Текст] : монография / А. Н. Борисов, Ю. Н. Попова. – Воронеж : ВГУ, 2004. – 84 с.

15. Борисов, И. Б. Обработка дерева [Текст] / И. Б. Борисов. – М. : Феникс, 2000. – 320 с.

16. Босинзон, М. А. Современные системы ЧПУ и их эксплуатация [Текст] : учеб. пособие / М. А. Босинзон. – М. : Академия, 2009. – 435 с.

17. Брусин, В. Г. Технологические режимы штамповки отверстий в деталях из фанеры [Текст] / В. Г. Брусин // Деревообрабатывающая промышленность. – 1978. – № 3. – С. 26–28.

18. Бугаков, В. М., Управление в экономических системах предприятий производства мебели с арабским и Российским дизайном [Текст] / В. М. Бугаков, В. С. Петровский, Н. К. Халаф. – Воронеж : ВГЛТА, 2009. – 183 с.

19. Бунаков, П. Ю. Автоматизация проектирования корпусной мебели [Текст] / П. Ю. Бунаков, А. В. Стариков. – М. : ДМК Пресс, 2009. – 160 с.

20. Владышевский, В. А. Штампование детали из слоистой древесины для мебели [Текст] / В. А. Владышевский // Деревообрабатывающая промышленность. – 1955. – № 5. – 293 с.

21. Гжиров, Р. И. Программирование обработки на станках с ЧПУ [Текст] : справочник / Р. И. Гжиров, П. П. Серебrenицкий – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. – 588 с.

22. Гончаров, Н. А. Технология изделий из древесины [Текст] : учебник для вузов / Н. А. Гончаров, В. Ю. Башинский, Б. М. Буглай. – М. : Лесная промышленность, 1990. – 528 с.

23. Гордиенко, В. В. Декорирование плоских элементов мебели прессованием рельефов [Текст] / В. В. Гордиенко, П. Г. Прудников, М. И. Фринлянд // Деревообрабатывающая промышленность. – 1979. – № 12. – 22–23 с.

24. Гордиенко, В. В. Декорирование фасадных поверхностей мебели [Текст] / В. В. Гордиенко // Лесное хозяйство. Лесная, бумажная и деревообрабатывающая промышленность. – 1980. – № 4. – с. 36–37.

25. Гордиенко, В. В. Деформирование древесностружечных плит при сжатии и принципы обработки их давлением [Текст] / В. В. Гордиенко, Ф. М. Манжос // Научно-технический прогресс в деревообрабатывающей промышленности : сб. науч. трудов. – Киев, 1980. – 33–102 с.

26. Гордиенко, В. В. Исследование реологических свойств древесностружечных плит [Текст] / В. В. Гордиенко // Деревообрабатывающая промышленность. – 1980. – № 3. – с 51–60.

27. ГОСТ 24329-80. Древесина модифицированная. Способы модифицирования [Текст]. – М. : ГК по стандартам, 1980. – 7 с.

28. Грибанов, А. А. Влияние особенностей технологического процесса фрезерования декоративных элементов мебели на разработку управляющих программ для станков с ЧПУ [Текст] / А. А. Грибанов, Хайдер А. Аббас Мохаммед // Актуальные проблемы лесного комплекса : сборник научных трудов. – Брянск : Брянск. гос. инженерно-технолог. академия, 2014. – Вып. 40. – С. 69–72.

29. Грибанов, А. А. Системный анализ процесса фрезерования декоративных элементов мебели и его оптимизация [Электронный ресурс] / А. А. Грибанов, Мохаммед Хайдер А. Аббас // Лесной комплекс: состояние и перспективы развития : материалы 12 международной научно-технической конференции. – Брянск : БГИТА, 2013. – С. 67–72.

30. Грубэ, А. Э. Дереворежущие инструменты [Текст] / А. Э. Грубэ. – М. : Лесная промышленность, 1971. – 343 с.

31. Гулд, Х., Компьютерное моделирование в физике [Текст]. В 2 ч. Ч. 2 / Х. Гулд, Я. Тобочник. – М. : Мир, 1990. – 400 с.

32. Данилов, А. Д. Автоматизация технологических процессов и производств в деревообрабатывающей отрасли [Текст] : учебник / А. Д. Данилов. – Воронеж : ВГЛТА, 2010. – 32 с.
33. Дегтярев, Ю. И. Методы оптимизации [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. И. Дегтярев. – М. : Сов. радио, 1980. – 272 с.
34. Демьяновский, В. И. Износостойкость инструмента для фрезерования древесины [Текст] / В. И. Демьяновский. – М. Лесная промышленность, 1963. – 126 с.
35. Дубинин, Д. В. Оценка качества алгоритмов оконтуривания объектов на изображениях, аппроксимированных однородными марковскими полями [Текст] / Д. В. Дубинин, В. Е. Лаевский, А. И. Кочегуров // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – т. 317. – № 5. – С. 92–99.
36. Ефимова, Т. В. Повышение качества профильного фрезерования поверхности древесноволокнистых плит средней плотности [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Т. В. Ефимова. – Воронеж, 2010. – 153 с.
37. Ефимова Т. В. Физическая модель структуры МДФ и процесса ее фрезерования [Текст] / Т. В. Ефимова, Е. М. Разиньков, Т. Л. Ищенко // Деревообрабатывающая промышленность. – 2013. – № 2–3. – С. 6–10.
38. Иванов, Д. Эффективный алгоритм построения остова растрового изображения [Текст] / Д. Иванов, Е. Кузьмин // International Conference Graphicon. – Москва, 1998. – С. 121–126.
39. Инженерные расчеты на ЭВМ: справочное пособие [Текст] / под ред. В. А. Троицкого. – Л. : Машиностроение, 1979. – 288 с.
40. Исследование теплофизических свойств модифицированной древесины [Текст] / Т. К. Касаткина, В. Е. Милошенко, В. А. Шамаев, А. И. Анучин // Материалы 15-й Всерос. конф. студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ 15. – Кемерово, 2009. – С. 299–300.
41. Касаткина, Т. К. Низкотемпературное устройство получения модифицированной древесины [Текст] / Т. К. Касаткина, В. Е. Милошенко, В. А. Шамаев // Молодежь и наука: реальность и будущее : материалы II межд. науч.

практич. конф. – Невинномысск, 2009. – С. 55–56.

42. Киселева, А. В. Экологические и генотипические аспекты формирования древесины сосны обыкновенной [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / А. В. Киселева. – Воронеж, 2002. – 183 с.

43. Кривцов, А. М. Деформирование и разрушение тел с микроструктурой [Текст] / А. М. Кривцов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 304 с.

44. Лагарьков, А. Н. Метод молекулярной динамики в статистической физике [Текст] / А. Н. Лагарьков, В. М. Сергеев // УФН. – 1978. – т. 125. – № 7. – С. 409–448.

45. Любченко, В. Н. Резание древесины и древесных материалов [Текст] : уч. пос. для вузов / В. Н. Любченко. – М. : Лесная промышленность, 1986. – 296 с.

46. Математическое моделирование и оптимизация управления процессом фрезерования декоративных элементов мебели [Текст] / Хайдер А. Аббас Мохаммед, Махмуд Насер Нихад, А. А. Грибанов, В. С. Петровский, Д. О. Козельчук // Лесотехнический журнал. – 2014. – Т. 4, № 2 (14). – С. 242–246.

47. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов [Текст] / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рошин. – Л. : Колос, 1980. – 168 с.

48. Мовнин, М. С. Подающие механизмы деревообрабатывающих станков [Текст] / М. С. Мовнин. – М. : Маш-гиз, 1953. – 173 с.

49. Мовнин, М. С. Создание и разработка оборудования и технологии тиснения изобретений на деталях из кускового шпона и отходов фанеры [Текст] : отч. по НИР / М. С. Мовнин. – Л., 1981. – 154 с.

50. Мовнин, М. С., Цой Ю.И., Овчинникова О.А. Использование модифицированных древесных отходов для приготовления отделочных элементов [Текст] / М. С. Мовнин, Ю. И. Цой, О. А. Овчинникова // Технология и оборудование деревообрабатывающих производств : межвуз. сборник НТР ВНИД. – Л., 1980. – С. 69–70.

51. Моисеев, А. В. Износостойкость дереворежущего инструмента [Текст]

/ А. В. Моисеев // М. : Лесная промышленность, 1981. – 110 с.

52. Мохаммед, Хайдер А. Аббас. Алгоритм оцифровки и векторизации рисунка декоративного элемента мебели [Текст] / Хайдер А. Аббас Мохаммед, В. С. Петровский // Перспективы инновационного развития современного мирового сообщества: экономико-правовые и социальные аспекты : материалы Международной юбилейной научно-практической конференции ВЭПИ-ВГЛТА-2012. – М., 2012. – Т. 4. – С. 162–165.

53. Мохаммед, Хайдер А. Аббас. Математическая модель фрезерования древесины как основа для алгоритмов оптимального управления фрезерным станком при декоративном и художественном фрезеровании [Текст] / Хайдер А. Аббас Мохаммед // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика : сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции. – Воронеж : ВГЛТА, 2014. – № 5, ч. 2 (10–2). – С. 207–210.

54. Мохаммед, Хайдер А. Аббас. Математическая модель фрезерования древесины с учетом структуры обрабатываемой поверхности [Текст] / Хайдер А. Аббас Мохаммед // Юность и знания – гарантия успеха : сборник научных трудов международной научно-технической конференции. – Курск, 2014. – С. 285–288.

55. Мохаммед, Хайдер А. Аббас. Методика автоматической векторизации узора декоративного элемента мебели и разработки программы для станка с ЧПУ по гравировке его контура [Текст] / Хайдер А. Аббас Мохаммед, В. С. Петровский, А. А. Грибанов // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Системный анализ и информационные технологии. – 2013. – № 1. – С. 142–146.

56. Мохаммед, Хайдер А. Аббас. Особенности производства декоративных элементов мебели на станках с ЧПУ [Текст] / Хайдер А. Аббас Мохаммед, В. С. Петровский // Актуальные проблемы профессионального образования: подходы и перспективы : материалы 10 международной научно-практической конференции. – Воронеж, 2012. – С. 373–374.

57. Мохаммед, Хайдер А. Аббас. Особенности разработки программного обеспечения станков с ЧПУ в производстве мебели [Текст] / Хайдер А. Аббас Мохаммед // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем управления лесного комплекса : межвузовский сборник научных трудов. – Воронеж, 2010. – Вып. 15. – С. 125–129.

58. Мохаммед, Хайдер А. Аббас. Подход к комплексной автоматизации мебельного производства [Текст] / Хайдер А. Аббас Мохаммед // Интеллектуальные информационные системы : труды Всероссийской конференции. – Воронеж, 2011. – С. 122–125.

59. Мохаммед, Хайдер А. Аббас. Разработка автоматизированных систем числового программного управления производством декоративных элементов мебели [Текст] / Хайдер А. Аббас Мохаммед, П. В. Мурзин, В. С. Петровский // Лесотехнический журнал. – 2012. – № 2 (6). – С. 120–123.

60. Мохаммед, Хайдер А. Аббас. Система управления оборудованием с ЧПУ [Текст] / Хайдер А. Аббас Мохаммед, А. А. Грибанов // Проблемы современных экономических, правовых и естественных наук в России : сборник материалов международной научно-практической конференции. – Воронеж, 2013. – С. 375–377.

61. Мохаммед, Хайдер А. Аббас. Структура производственно-технологических информационных потоков автоматизированного управления производством мебельного предприятия [Текст] / Хайдер А. Аббас Мохаммед, В. С. Петровский // Лесотехнический журнал. – 2012. – № 3 (7). – С. 99–104.

62. Мохаммед, Хайдер А. Аббас. Технологии формирования крупногабаритных мебельных щитов с декоративными элементами [Текст] / Хайдер А. Аббас Мохаммед // Лесотехнический журнал. – 2011. – № 3 (3). – С. 7–10.

63. Новая парадигма проектирования САПР сложной корпусной мебели для позаказного промышленного производства [Текст] : монография / П. Ю. Бунаков, А. В. Стариков, А. А. Старикова, В. Н. Харин. – М. : ГОС ВПО МГУЛ, 2007. – 319 с.

64. Ольшевский, В. А. Опыт изготовления декоративных элементов мебели [Текст] / В. А. Ольшевский // Деревообрабатывающая промышленность. – 1984. – № 12. – С. 41–46.

65. Остудин, Ю. Н. Изготовление декоративных элементов мебели [Текст] / Ю. Н. Остудин // ВНИИПЭИ. Мебель : научно-техн. реферир. сборник. – 1983. – вып. 3. – С. 104–110.

66. Памфилов Е. А. Обеспечение работоспособности рабочих органов и инструментов машин и оборудования лесного комплекса [Текст] / Е. А. Памфилов, П. Г. Пыриков, А. Н. Заикин, В. М. Меркелов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2010. – № 3. – С. 110–114.

67. Памфилов Е. А. Оптимизация составов наплавочных материалов для повышения работоспособности древесно-металлических пар трения [Текст] / Е. А. Памфилов, Я. С. Прозоров, А. В. Шпаков // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2014. – № 19. – С. 89–93.

68. Перельгин, Л. М. Древесиноведение [Текст] / Л. М. Перельгин, Б. Н. Уголев. – М. : Лесная промышленность, 1971. – 236 с.

69. Петровский, В. С. Автоматизация процесса обработки двумерных изображений при создании новых проектов [Текст] / В. С. Петровский, Хайдер А. Аббас Мохаммед, А. А. Грибанов // Вестник ВГТУ. – 2013 г. – т. 9 – № 1. – С. 36–40 с.

70. Петровский, В. С. Автоматизация технологических процессов и производств в деревообрабатывающей отрасли [Текст] : учебник / В. С. Петровский, А. Д. Данилов. – Воронеж: ВГЛТА, 2010. – 237 с.

71. Петровский, В. С. Исследование и разработка процесса фрезерования декоративных элементов мебели на станках с ЧПУ [Текст] / В. С. Петровский, Хайдер А. Аббас Мохаммед, А. А. Грибанов // Научно-практический и методологический журнал ФЭС. – 2013. – № 2 (51). – С. 53–55.

72. Петровский, В. С. Моделирование систем [Текст] / В. С. Петровский. – Воронеж : ВГЛТА, 2010. – 214 с.

73. Пилюшина Г. А. Повышение работоспособности рабочих органов

оборудования и режущих инструментов для обработки неметаллических материалов [Текст] / Г. А. Пилюшина, П. Г. Пыриков, А. С. Рухлядко. // СТИН. – 2013. – № 2. – С. 9–13.

74. Пижурин, В. А. Современные методы исследования технологических процессов в деревообработке [Текст] / В. А. Пижурин. – М. : Лесная промышленность, 1972. – 243 с.

75. Полухин, В. А. Компьютерное моделирование динамики и структуры жидких металлов [Текст] / В. А. Полухин, В. Ф. Ухов, М. М. Дзугутов. – М. : Наука, 1981. – 323 с.

76. Послухаев Н. И. Параметры процесса шлифования мебельных щитов [Текст] / Н. И. Послухаев, Е. М. Разиньков // Вестник Центрально-Черноземного регионального отделения наук о лесе Российской Академии. – Воронеж : ВГЛТА, 2007. – № 5. – С. 103–108.

77. Поташев, О. Е. Механика древесных плит [Текст] / О. Е. Поташев, Ю. Г. Лапшин – М. : Лесная промышленность, 1982. – 112 с.

78. Применение нанокристаллической целлюлозы в процессе склеивания модифицированной древесины [Текст] / В. А. Шамаев, Н. С. Никулина, А. В. Латынин, О. Л. Ерин // Перспективы науки. – 2011. – № 6. – С. 61–63.

79. Пушев, М. С. Штампование древесноволокнистых деталей для мебели [Текст] / М. С. Пушев, С. Д. Сухепко // Деревообрабатывающая промышленность. – 1955. – № 11. – С. 76–80.

80. Разиньков Е. М. Научные исследования в деревообработке : учеб. пособие [Текст] / Е. М. Разиньков, Е. В. Кантиева. – Воронеж : ВГЛТА, 2004. – 92 с.

81. Сарайкин, В. Г. Системы автоматизированного проектирования мебели и интерьера помещений : сопоставительный анализ и критерии оптимальности [Текст] / В. Г. Сарайкин, А. В. Стариков // Деревообрабатывающая промышленность. – 2003. – № 2. – С. 8–11.

82. Сафроненко, В. М., Инструменты и приспособления для работы с древесиной [Текст] / В. М. Сафроненко. – М. : Хэлтон, 1999. – 32 с.

83. Сафроненко, В. М., Секреты древесины [Текст] / В. М. Сафроненко. – М. : Харвест, 2003. – 544 с.

84. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015613968. Программа для моделирования процесса фрезерования древесины с заданной структурой [Текст] / А. А. Грибанов, Хайдер А. Аббас Мохаммед, В. В. Посметьев ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО "ВГЛТА" ; заявл. 24.12.2014 ; опубл. 01.04.2015.

85. Свиридов, Л. Т. Современные процессы и оборудование в деревообработке [Текст] / Л. Т. Свиридов, А. В. Ивановский, В. П. Ивановский. – Воронеж: Воронежский ЦНТИ - филиал ФГУ "РЭА" Минэнерго России, 2011. – 363 с.

86. Сергеевичев, А. В. Повышение эффективности оцилиндровки бревен путем совершенствования механизма резания [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / А. В. Сергеевичев. – Санкт-Петербург, 2002. – 165 с.

87. Снегирева, С. Н. Экологические и генотипические аспекты формирования древесины каштана посевного [Текст] : дис. ... канд. биол. наук / С. Н. Снегирева. – Воронеж, 2005. – 118 с.

88. Советов, Б. Я. Моделирование систем [Текст] : учебное пособие / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – М. : Высш. шк., 1998. – 319 с.

89. Соснин, М. И. Физические основы прессования древесностружечных плит в производстве изделий из древесины [Текст] / М. И. Соснин, М. И. Климов. – М. : Лесная промышленность, 1981. – 193 с.

90. Стариков, А. В. Мебельное предприятие как комплексный объект автоматизации [Текст] / А. В. Стариков, А. М. Катеринич, А. А. Штондин // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем управления лесного комплекса : межвузовский сборник научных трудов. – Воронеж : ВГЛТА, 2002. – Вып. 7. – С. 89–92.

91. Тамби А. А. Методика применения магнитно-резонансной томографии для оценки внутреннего строения и влажности круглых лесоматериалов [Текст] / А. А. Тамби, А. В. Теппоев, Ю. А. Шимкевич, И. Е. Гальсман // Извест-

тия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2013. – № 203. – С. 100–107.

92. Торопов А. С. Теоретические исследования точности пиления древесины круглыми пилами с применением электромагнитных направляющих [Текст] / А. С. Торопов, Е. Ю. Кузнецов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2013. – № 3 (333). – С. 86–96.

93. Уголев, Б. Н. Деформативность древесины и напряжения при сушке [Текст] / Б. Н. Уголев. – М. : Лесная промышленность, 1971. – 174 с.

94. Уголев, Б. Н. Древесиноведение и лесное товароведение [Текст] : учебник / Б. Н. Уголев. – М. : МГУЛ, 2007. – 351 с.

95. Фомин, А. А. Оборудование и технология механической обработки отходов лесопиления : монография [Текст] / А.А. Фомин // М. : Машиностроение, 2013. – 206 с.

96. Халаф, Намир Касем. Способы декорирования корпусной мебели (Обзорная информация) [Текст] / Намир Касем Халаф. – М. : ВНИИПИЭЛлеспром, 1982. – 36 с.

97. Харченко, А. П. Моделирование автоматической системы с фильтром Кальмана [Текст] / А. П. Харченко, Д. А. Карпюк, Хайдер А. Аббас Мохаммед // Инновации и энергосберегающие технологии в электроэнергетике : сборник трудов Международной научной конференции. – Воронеж : Междунар. ин-т компьют. технологий, 2012. – С. 125–128.

98. Хеерман, Д. В. Методы компьютерного эксперимента в теоретической физике [Текст] / Д. В. Хеерман. – М. : Наука, 1990. – 176 с.

99. Хуажев, О. З. Декоративные элементы разработанные и внедренные на ПМО «Кавказ» [Текст] / О. З. Хуажев, А. Э. Канданов // Материалы научно-технической конференции ВПКТИМ. – М., 1987. – С. 7–12.

100. Хуажев, О. З. Декорирование мебели [Текст] / О. З. Хуажев // Сб. мат. научной конф. «Машинная обработка мебельных деталей». – Рига : ЛатНИИНТИ, 1988. – С. 16–18.

101. Хуажев, О. З. Декорирование фасадных элементов мебели [Текст] /

О. З. Хуажев // Материалы научно-технической конференции. – Минск : БТИ, 1988. – С. 17–20.

102. Хуажев, О. З. Изготовление декоративных элементов мебели из древесины методом термопрессования [Текст] / О. З. Хуажев, А. Э. Канданов // Мебель ВНИПИЭИлеспром, 1982. – С. 14–17.

103. Хуажев, О. З. Об образовании рельефных поверхностей при термопрессовании древесины [Текст] / О. З. Хуажев // Научно-технический прогресс в деревообработке : сборник науч. тр. – Киев, 1986. – С. 33–38.

104. Хуажев, О. З. Оборудование для получения декора методом непрерывного прессования [Текст] / О. З. Хуажев // Материалы научной конференции. – Ганновер (ФРГ) : Лигна, 1999. – с. 66–78.

105. Хуажев, О. З. Совмещенное прессование декора с получением отделанной поверхности / О. З. Хуажев // Материалы научной конференции. – Киев : УкрНИИМОД, 1998. – С. 4–9.

106. Хухрянский, П. Н. Прессование древесины [Текст] / П. Н. Хухрянский. – М. : Лесная промышленность, 1964. – 350 с.

107. Хухрянский, П. Н. Прочность древесины [Текст] / П. Н. Хухрянский. – М. : Гослесбумиздат, 1955. – 150 с.

108. Чубинский А. Н. Обоснование объемного выхода пиломатериалов для клееных деревянных конструкций на основе физических свойств древесины [Текст] / А. Н. Чубинский, А. А. Тамби, Е. Г. Хитров и др. // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2014. – № 206. – С. 146–153.

109. Чубинский А. Н. Физические неразрушающие методы испытания и оценка структуры древесных материалов [Текст] / А. Н. Чубинский, А. А. Тамби, А. В. Теппоев и др. // Дефектоскопия. – 2014. – № 11. – С. 76–84.

110. Шамаев, В. А. Достижения и проблемы модифицированной древесины [Текст] / В. А. Шамаев, И.В. Воскобойников, В. М. Щеков // Материалы IV международного Евразийского симпозиума "Деревообработка". – Екатеринбург, 2009. – С. 224–229.

111. Шамаев, В. А. Модифицирование древесины [Текст] : учеб. пособие /

В.А. Шамаев. – Воронеж : ВГЛТА, 2006. – 386 с.

112. Шамаев, В. А. Результаты исследований упругих свойств древесины осины при ударных нагрузках [Текст] / В. А. Шамаев, И. В. Ивановский // Дизайн и производство мебели. – 2008. – № 1. – С. 39–41.

113. Шамаев, В. А. Современное состояние и пути развития модифицированной древесины [Текст] / В. А. Шамаев // Материалы межд. научн.-техн. конференции «Современные проблемы механической технологии древесины». – СПб., 2010. – С. 11–17.

114. Шамаев, В. А. Способ получения модифицированной древесины воздействием электромагнитного излучения [Текст] / В. А. Шамаев // Технология и оборудование деревообработки в XXI веке : межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж : ВГЛТА, 2008. – Вып. 4. – С. 80–85.

115. Шамаев, В. А. Стабилизация форм и размеров прессованной древесины физическими методами [Текст] / В. А. Шамаев // Лесной журнал. – 2010. – № 6. – С. 96–99.

116. Шамаев, В. А. Сушка древесины, пропитанной карбамидом [Текст] / В. А. Шамаев // Труды международного научн.-технич. семинара. – Воронеж, 2010. – С. 395–408.

117. Шарапов Е. С. Результаты экспериментальных исследований свойств древесины круглых лесоматериалов по радиусу ствола [Текст] / Е. С. Шарапов, А. С. Торопов, В. Ю. Чернов // Вестник МГУЛ - Лесной вестник. – 2012. – № 2 (85). – С. 162–167.

118. Шварцман, Г. М. Производство древесностружечных плит [Текст] / Г. М. Шварцман. – М. : Лесная промышленность, 1977. – 312 с.

119. Щедрин, Е. Д. Прогноз стилей бытовой мебели на 1980–2000 гг. [Текст] / Е. Д. Щедрин // Деревообрабатывающая промышленность. – 1973. – № 3. – С. 3–6.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015613968

"Программа для моделирования процесса фрезерования древесины с заданной структурой"

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежская государственная лесотехническая академия» (RU)*

Авторы: *Грибанов Андрей Анатольевич (RU), Мохаммед Хайдер А. Аббас (RU), Посметьев Виктор Валерьевич (RU)*

Заявка № 2014663506

Дата поступления 24 декабря 2014 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 01 апреля 2015 г.

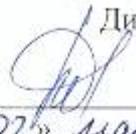


Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ООО "МИГ мебель"
г. Воронеж,
ул. Независимости, 80б

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор

Мишакин С.И.
«02» марта 2015г.

АКТ производственных испытаний технологии декоративного фрезерования древесины с предварительным оптическим распознаванием структуры поверхности

На ООО "МИГ мебель" проведены производственные испытания технологии адаптивного фрезерования древесины (результаты диссертационной работы автора Мохаммед Хайдер А. Аббас), заключающейся в предварительном оптическом распознавании структуры поверхности обрабатываемой детали и последующем фрезеровании узора с регулированием скорости подачи фрезы в зависимости от локальной структуры поверхности.

Испытания проводили на фрезерно-гравировальном станке с ЧПУ Beaver на элементах мебели из древесины дуба.

Установлено, что благодаря регулированию скорости подачи повышается производительность процесса на 15 % (за счет большей скорости подачи на участках, где низкий риск сколов), снижается в целом шероховатость поверхности, что упрощает на 10 % трудоемкость последующей операции шлифования, а также уменьшается количество сколов в 2,3 раза.

Результаты испытаний показали, что при внедрении разработанной технологии адаптивного фрезерования в производство ООО "МИГ мебель" годовой экономический эффект составит 420000 рублей, срок окупаемости капитальных вложений (доработка системы оптического распознавания и интеграция в управляющую программу фрезерного комплекса) составит 3 месяца.

От ООО «МИГ мебель»:

Зам. директора
по производству
Тимохин Д.И.



От ФГБОУ ВПО «ВГЛТА»:

аспирант
Мохаммед Хайдер А. Аббас

"Утверждаю"
ген. директор ОАО "Графское"
К.И. Степанов В.А.
2014 г.



АКТ

**о внедрении результатов научно исследовательской работы
"СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ
ДЕКОРАТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕБЕЛИ НА СТАНКАХ С ЧПУ"**

Комиссия в составе :

председатель - главный инженер ОАО "Графское" Степанов Г.В.,

члены комиссии : проф. ФГБОУ ВПО "ВГЛТА" Петровский В. С.,

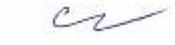
асп.ФГБОУ ВПО "ВГЛТА" Мохаммед Хайдер А.Аббас, доц. ФГБОУ ВПО
"ВГЛТА" Грибанов

составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательской работы "СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДЕКОРАТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕБЕЛИ НА СТАНКАХ С ЧПУ" использованы в производстве декоративных элементов мебели ОАО "Графское" при разработке управляющих программ для станков с ЧПУ при фрезеровании декоративных элементов мебели. Разработанная в диссертационной работе технология адаптивного фрезерования позволила определить оптимальные значения скоростей подачи фрезы в зависимости от структуры поверхности и влажности заготовки. Проведенные испытания режимов фрезерования с

использованием данных таблицы опытных образцов фасадов кухонных гарнитуров на станке с ЧПУ с программным обеспечением SheetCAM/Mach3 показали высокую производительность оборудования при минимальной шероховатости поверхности деталей.

Использование указанных результатов позволяет изготавливать декоративные элементы фасадов кухонных гарнитуров с высокой производительностью и требуемым качеством обработки поверхности.

Главный инженер ОАО "Графское"  Степанов Г. В.

От ВГЛТА  профессор Петровский В. С.

 доцент Грибанов А. А.

 аспирант Мохаммед Хайдер А.Аббас



ДОСТУПНАЯ РОБОТОТЕХНИКА

Общество с ограниченной ответственностью

Тел. 8-910-345-90-75, e-mail victorvpo@mail.ru

Роботы, программирование, компьютерное моделирование

394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8

ИНН 3666172199, КПП 366601001, ОГРН 1113668024865

р/с 40702810908200017831 в ОАО АКБ "АВАНГАРД",

БИК 044525201, к/с 30101810000000000201

12 марта 2015 г.

АКТ

производственных испытаний технологии адаптивного фрезерования
древесины на основе предварительного оптического анализа
структуры ее поверхности

В период со 2 по 12 марта 2015 г. сотрудниками ООО "Доступная робототехника" проведены производственные испытания технологии адаптивного декоративного фрезерования древесины. Для реализации данной технологии фрезерный станок с ЧПУ PRLA4 был оснащен высокоразрешающей видеокамерой "Logitech HD Webcam C930e" для осуществления непрерывного оптического анализа структуры древесины и было модифицировано программное обеспечения станка для управления подачей фрезы в соответствии с локальной структурой. Затраты на модернизацию фрезерного станка составили около 50 000 рублей. Испытания технологии проводили на заготовках из древесины сосны. Задаaniem на фрезерование служил декоративный рисунок из более 100 отдельных элементов (прямолинейных и радиусных участков).

В результате производственных испытаний установлено, что предложенная Мохаммедом Хайдером А. Аббасом технология адаптивного декоративного фрезерования позволяет значительно повысить качество и производительность процесса фрезерования. Производительность фрезерования повысилась на 15–20 % из-за ускорения подачи фрезы на

участках траектории с учетом макроструктуры древесины. Установлено уменьшение шероховатости поверхности на 10–20 % за счет автоматического выбора параметров фрезерования, максимально учитывающих макроструктуру древесины. Эффективность технологии адаптивного фрезерования заключается в уменьшении количества сколов в 2–3 раза, что значительно снижает последующие затраты на восстановление элемента мебели.

Прогнозируемый годовой экономический эффект от технологии адаптивного фрезерования составляет не менее 300 000 рублей для объема производства 5 000 элементов мебели с элементами декоративного фрезерования.

Директор ООО
"Доступная робототехника"



 Посметьев В.В.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

РЕКОМЕНДОВАНО :

Учебно-методической комиссией

ФГБОУ ВПО «ВГЛТА»

Протокол № 7 от 25 марта 2015 г.

Председатель УМК,

профессор  Макеев В.И.

УТВЕРЖДАЮ :

Ректор ФГБОУ ВПО «ВГЛТА»

профессор  Бугаков В.М.

2015 г.



АКТ

О внедрении в учебный процесс на кафедрах механической технологии древесины и древесиноведения ФГБОУ ВПО «ВГЛТА» научных разработок по проблеме «СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДЕКОРАТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕБЕЛИ НА СТАНКАХ С ЧПУ».

1. Работа выполнена на кафедре автоматизации производственных процессов
2. Исполнитель – Мохаммед Хайдер А.Аббас
3. Научный руководитель - доктор технических наук , профессор Петровский Владислав Сергеевич

4. Результаты, полученные соискателем : Физико-математическая модель процесса фрезерования древесины с заданной структурой годичных слоев, позволяющая определить рациональные технологические параметры. Закономерности формирования качественной поверхности древесины при ее фрезеровании, позволяющие обосновать рациональные технологические параметры процесса. Методика оптического распознавания структуры поверхности древесины, позволяющая определять направленность волокон вдоль траектории фрезерования . Технология фрезерования с переменной скоростью подачи фрезы, позволяющая повысить качество и производительность процесса на основе предварительного оптического анализа структуры поверхности древесины.

5. Краткое описание результатов внедрения, конечный результат.

Компьютерная программа, реализующая физико-математическую модель процесса фрезерования древесины с заданной структурой годичных слоев используется для визуализации процесса фрезерования древесины при ознакомлении студентов в ходе занятий по указанным курсам. Методика оптического распознавания структуры поверхности древесины, позволяющая определять направленность волокон вдоль траектории фрезерования, преподается, как перспективный метод автоматизации обработки древесины, позволяющий повысить качество фрезерования.

6. Внедрение по курсу дисциплин : «Технологии изделий из древесины» , «Дереворежущие станки и инструменты».
7. Влияние на качество подготовки специалистов. Повышение качества подготовки специалистов производится за счет изучения и использования современных методов моделирования процесса обработки древесины, оптического распознавания структуры древесины, автоматического управления процессом фрезерования.

8. **Рекомендации** : результаты исследований используются в лекционном курсе дисциплин, курсовом проектировании кафедр механической технологии древесины и древесиноведения.
9. **Эффект от внедрения** : повысилось качество учебного процесса.

Результаты выполненной диссертационной работы Мохаммед Хайдер А.Аббас на тему «СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДЕКОРАТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕБЕЛИ НА СТАНКАХ С ЧПУ» были заслушаны на заседании кафедры древесиноведения 12 марта 2015 г. , протокол № (8) и кафедры механической технологии древесины 16 марта 2015 г. протокол № (8).

Заведующий кафедрой

Механической технологии древесины, профессор



Разиньков Е.М.

Заведующий кафедрой

Древесиноведения, профессор



Платонов А.Д.

Аспирант



Мохаммед Х.А.А.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

«Воронежская государственная лесотехническая академия»



«Утверждаю»

проректор по науке и инновациям

Драпалюк М.В.

« » 2014 г.

АКТ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

режимов фрезерования опытных образцов заготовок из МДФ на станке с ЧПУ Purelogic PRLA4 с программным обеспечением SheetCAM/Mach3 (Система)

от «20» 11 2013 г.

В соответствии с исследованиями в области производства деталей мебели

Комиссия в составе:

Председателя комиссии:

проф. Стариков А. В.

Членов комиссии:

проф. Петровский В. С.

доц. Грибанов А. А.

асп. Мохаммед Хайдер А. Аббас

«14» ноября 2013 г. провела испытания режимов фрезерования опытных образцов заготовок из МДФ на станке с ЧПУ Purelogic PRLA4 с программным обеспечением SheetCAM/Mach3 (Система).

Испытания проводились в здании кафедры автоматизации производственных процессов ФГБОУ ВПО «ВГЛТА», по адресу г. Воронеж, ул. Морозова 4.

1. Объект испытаний

1.1. Объектом испытаний являются режимы фрезерования опытных образцов заготовок из МДФ на станке с ЧПУ Purelogic PRLA4 с программным обеспечением (ПО) SheetCAM/Mach3 (Система).

1.2. Объект испытаний представлен на испытания в следующем составе:

1.2.1. Двенадцать заготовок из МДФ (опытный образец);

1.2.2. Станок с ЧПУ Purelogic PRLA4 (опытный образец);

1.2.3. Фрезы диаметром 4, 6, 8 мм (опытный образец);

- 1.2.4. Профилометр Hommel Tester 100;
- 1.2.5. ПО SheetCAM/Mach3.
- 1.3. Для проведения испытаний Исполнителем представлена следующая организационно-методическая документация:
 - 1.3.1. Программа и методика испытаний;
 - 1.3.2. Документация технического проекта;
 - 1.3.3. Документация рабочего проекта.
2. Цель испытаний – получение целевых функций управления по чистоте обработке и производительности с учетом возмущающего воздействия – влажности древесного материала.
3. Результаты испытаний
 - 3.1. Испытания **режимов фрезерования опытных образцов заготовок из МДФ на станке с ЧПУ Purelogic PRLA4 с программным обеспечением (ПО) SheetCAM/Mach3 (Система)** позволили получить показатели шероховатости и производительности станка, представленные в табл. 1
 - 3.2. Показатели шероховатости (табл. 1), полученные в результате испытания **режимов фрезерования опытных образцов заготовок из МДФ на станке с ЧПУ Purelogic PRLA4 с программным обеспечением (ПО) SheetCAM/Mach3 (Система)** позволили получить целевые функции для ведения оптимального управления процессом фрезерования декоративных элементов мебели с учетом их влажности.
 - 3.3. При испытаниях установлено, что **режимы фрезерования опытных образцов заготовок из МДФ на станке с ЧПУ Purelogic PRLA4 с программным обеспечением (ПО) SheetCAM/Mach3 (Система)** соответствуют требованиям программы и методики испытаний.
 - 3.4. Оптимальные значения скорости подачи и резания в зависимости от влажности заготовки из МДФ (табл. 2).

Таблица 1

Результаты испытания режимов фрезерования опытных образцов заготовок из МДФ

Номер заготовки	Скорость подачи, мм/мин V	Скорость резания, об/мин ω	Влажность, % f	Диаметр фрезы, мм	Показатели шероховатости			Производительность, сек Р
					Rmax, мкм	Rz, мкм	Ra, мкм	
1	2500	25000	7	6	74,6	42,0	6,33	27
				4	106,0	60,9	10,00	
				8	56,0	47,8	8,51	
2	2500	10000	5	6	57,39	39,54	8,133	27
				4	49,90	46,97	9,134	
				8	51,09	40,19	7,850	
3	500	25000	7	6	49,21	42,71	7,161	53
				4	52,05	56,75	8,05	
				8	63,54	51,35	10,534	
4	500	10000	5,5	6	94,28	58,22	11,507	53
				4	56,78	40,25	7,813	
				8	54,29	41,03	8,010	
5	1500	17500	5	6	39,78	29,08	5,074	29
				4	58,64	40,67	7,435	
				8	52,55	47,68	9,489	
6	2500	17500	6	6	82,25	53,08	10,269	27
				4	49,66	41,22	7,992	
				8	60,53	50,48	9,776	
7	1500	10000	6	6	43,66	34,14	6,164	29
				4	63,45	45,12	7,740	
				8	88,50	60,16	8,743	
8	1500	25000	6	6	46,13	35,79	6,257	29
				4	44,71	32,55	5,858	
				8	51,60	42,36	7,687	
9	1500	17500	8	6	81,6	64,1	12,53	29
				4	124,8	73,0	11,78	
				8	102,3	60,0	10,84	
10	1500	17500	6,5	6	77,52	50,76	8,137	29
				4	96,4	60,5	9,73	
				8	63,39	41,03	7,246	
11	1500	17500	6	6	88,4	55,9	9,58	29
				4	83,5	61,7	13,75	
				8	50,4	43,9	8,38	
12	1500	17500	5,5	6	39,01	29,55	6,047	29
				4	65,57	60,83	10,700	
				8	57,37	46,44	8,555	

Таблица 2

Влажность, f	Фреза 4мм		Фреза 6мм		Фреза 8мм	
	Скорость подачи, V	Скорость резания, ω	Скорость подачи, V	Скорость резания, ω	Скорость подачи, V	Скорость резания, ω
5	1434	13866	1230	8297	1638	8532
5,1	1434	14142	1256	9138	1620	9280
5,2	1434	14420	1282	9979	1602	10027
5,3	1434	14697	1308	10821	1584	10774
5,4	1434	14975	1335	11662	1567	11521
5,5	1434	15252	1361	12504	1549	12269
5,6	1434	15529	1387	13345	1531	13016
5,7	1434	15807	1413	14187	1513	13763
5,8	1434	16084	1439	15028	1496	14510
5,9	1434	16361	1466	15859	1478	15258
6,0	1434	16638	1492	16710	1460	16005
6,1	1434	16916	1518	17552	1442	16752
6,2	1434	17193	1544	18394	1425	17500
6,3	1434	17471	1571	19235	1407	18246
6,4	1434	17747	1597	20076	1390	18994
6,5	1434	18025	1623	20918	1372	19742
6,6	1434	18303	1649	21759	1354	20489
6,7	1434	18580	1675	22601	1337	21236
6,8	1434	18857	1702	23442	1319	21983
6,9	1434	19134	1727	24283	1302	22731
7,0	1434	19412	1754	25124	1283	23478

Председатель комиссии:

проф. Стариков А. В.

Члены комиссии:

проф. Петровский В. С.

доцент Грибанов А.А.

аспирант Мохаммед Хайдер А. Аббас

Текст программы для определения скорости подачи фрезы
при адаптивном фрезеровании

```

unit FrezWood;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Con-
  trols, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, ExtCtrls;

type
  TForm1 = class(TForm)
    Button1: TButton;
    Timer1: TTimer;
    PaintBox1: TPaintBox;
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
    procedure Timer1Timer(Sender: TObject);
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure PaintBox1Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

VAR
  Form1: TForm1;
  BMP:TBitmap;
  start:boolean;
  NExp,NFrame:longint;

  i,j,k,o,e:longint;
  t,dt:extended;
  Capture: TBitmap;
  MR,MG,MB,M,M2:array[0..5000,0..5000] of longint;
  TeFile:textFile;
  FName:string;
  Refres:boolean;
  LEV:array[0..10000,0..4]of integer;
  NLEV:longint;
  r,r1:extended;
  ESize:Extended;

  x0,y0,dx0,dy0,xC,yC,xt,yt:longint;
  f,W0,W,WC,WS:array[-1000..1000]of extended;

```

```
WNX,WNY,Wd1,Wd2,Wr1,Wr2:extended;  
Mid:extended;  
alf,bet,vpod:extended;
```

```
implementation
```

```
{$R *.dfm}  
{$M 10000, 120000000}
```

```
Procedure ReadMap;
```

```
begin  
  {Считывание фотографии}  
  Capture := TBitmap.Create;  
  Capture.FreeImage;  
  Capture.LoadFromFile('d:\wood03.bmp');  
  for i:=0 to 1200 do  
    for j:=0 to 1200 do  
      begin  
        M[i,j]:=Capture.Canvas.Pixels[i,j];  
        MR[i,j]:=GetRValue(M[i,j]);  
        MG[i,j]:=GetGValue(M[i,j]);  
        MB[i,j]:=GetBValue(M[i,j]);  
        M2[i,j]:=RGB(MR[i,j],MG[i,j],MB[i,j]);  
      end;  
    end;
```

```
Procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);  
begin  
  start:=not start;  
  ReadMap;  
end;
```

```
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);  
begin  
  start:=false;  
  NExp:=0;  
  NFrame:=0;  
  Refres:=true;  
  
  NLEV:=0;  
  
end;
```

```
Procedure Draw;  
begin  
  if Refres then  
    begin  
      BMP.Free;  
      BMP:=TBitmap.Create;  
      BMP.Width:=1150;  
      BMP.Height:=650;  
    end;
```

```

With BMP.Canvas do
  begin
    for i:=1 to 650 do for j:=1 to 650 do Pixels[i,j]:=M2[i,j];

{ОСНОВНЫЕ ДЕЙСТВИЯ}
{Распределяем ключевые точки по окружности}
for e:=1 to 24 do
  begin
    xO:=round(325+250*cos(e*15/180*pi));
    yO:=round(325-250*sin(e*15/180*pi));
    xC:=round(325+300*cos(e*15/180*pi));
    yC:=round(325-300*sin(e*15/180*pi));
    xt:=round(325+200*cos(e*15/180*pi));
    yt:=round(325-200*sin(e*15/180*pi));
    bet:=e*15/180*pi;
    dxO:=20; dyO:=20;
    {Показываем область квадратом}
    Pen.Width:=2; Pen.Color:=ClBlack;
    MoveTo(round(xO-dxO),round(yO-dyO));
    LineTo(round(xO+dxO),round(yO-dyO));
    LineTo(round(xO+dxO),round(yO+dyO));
    LineTo(round(xO-dxO),round(yO+dyO));
    LineTo(round(xO-dxO),round(yO-dyO));
    //TextOut(xC-12,yC-20,'N'+IntToStr(e));

    {Считаем среднюю интенсивность}
    Mid:=0;
    for i:=xO-dxO to xO+dxO do for j:=yO-dyO to yO+dyO do
      Mid:=Mid+MB[i,j];
    Mid:=Mid/sqr(2*dxO+1);

    {Считаем Фурье-спектры вдоль x и вдоль y в квадрате 2dxO x 2dyO}
    {Готовим функцию для Фурье-спектра вдоль x}
    for i:=-dxO to dxO do
      begin
        r:=0;
        for j:=-dyO to dyO do
          r:=r+MB[i+xO,j+yO];
        f[i]:=r/(2*dyO+1);
        k:=round(f[i]);
        Pen.Color:=RGB(k,k,k);
        {MoveTo(xO+i,yO+dyO-1);
        LineTo(xO+i,yO-dyO); }
      end;
    {Считаем нулевой Фурье-спектр}
    for i:=-100 to 100 do
      begin
        WC[i]:=0; WS[i]:=0;
        for j:=-dxO to dxO do
          begin

```

```

        WC[i]:=WC[i]+{f[j]}Mid*cos(i*j*0.02);
        WS[i]:=WS[i]+{f[j]}Mid*sin(i*j*0.02);
        end;
    W0[i]:=sqrt(sqr(WC[i])+sqr(WS[i]));
    end;
{Считаем Фурье-спектр}
for i:=-100 to 100 do
    begin
        WC[i]:=0; WS[i]:=0;
        for j:=-dx0 to dx0 do
            begin
                WC[i]:=WC[i]+f[j]*cos(i*j*0.02);
                WS[i]:=WS[i]+f[j]*sin(i*j*0.02);
            end;
        W[i]:=sqrt(sqr(WC[i])+sqr(WS[i]));
    end;
{Рисуем график спектра}
if e=4 then
    begin
        Pen.Color:=ClBlack;
        Rectangle(700,50,1100,200);
        MoveTo(700,200);
        for i:=0 to 100 do
            LineTo(700+i*4,200-round(W0[i]*(i+1e-10)*0.003));
        end;
if e=5 then
    begin
        Pen.Color:=ClBlack;
        Rectangle(700,250,1100,400);
        MoveTo(700,400);
        for i:=0 to 100 do
            LineTo(700+i*4,400-round((W[i]-W0[i])*(i+1e-10)*0.003));
        end;
if e=16 then
    begin
        Pen.Color:=ClBlack;
        Rectangle(700,450,1100,600);
        MoveTo(700,600);
        for i:=0 to 100 do
            LineTo(700+i*4,600-round((W[i]-W0[i])*(i+1e-10)*0.003));
        end;
{Считаем мощность спектра}
WNX:=0;
for i:=0 to 100 do WNX:=WNX+sqr((W[i]-W0[i])*i);

{Готовим функцию для Фурье-спектра вдоль y}
for i:=-dy0 to dy0 do
    begin
        r:=0;
        for j:=-dx0 to dx0 do
            r:=r+MB[j+dx0,i+dy0];
        f[i]:=r/(2*dx0+1);
        k:=round(f[i]);

```

```

    Pen.Color:=RGB(k,k,k);
    {MoveTo(xO-dxO,yO+i);
    LineTo(xO+dxO-1,yO+i);}
    end;
{Считаем Фурье-спектр вдоль y}
for i:=-100 to 100 do
    begin
        WC[i]:=0; WS[i]:=0;
        for j:=-dyO to dyO do
            begin
                WC[i]:=WC[i]+f[j]*cos(i*j*0.02);
                WS[i]:=WS[i]+f[j]*sin(i*j*0.02);
            end;
        W[i]:=sqrt(sqr(WC[i])+sqr(WS[i]));
    end;
{Рисуем график спектра}
if e=4 then
    begin
        Pen.Color:=ClBlack;
        Rectangle(700,50,1100,200);
        MoveTo(700,200);
        for i:=0 to 100 do
            LineTo(700+i*4,200-round(W0[i]*(i+1e-10)*0.003));
        end;
if e=5 then
    begin
        Pen.Color:=ClBlack;
        Rectangle(700,250,1100,400);
        MoveTo(700,400);
        for i:=0 to 100 do
            LineTo(700+i*4,400-round((W[i]-W0[i])*(i+1e-10)*0.003));
        end;
if e=16 then
    begin
        Pen.Color:=ClBlack;
        Rectangle(700,450,1100,600);
        MoveTo(700,600);
        for i:=0 to 100 do
            LineTo(700+i*4,600-round((W[i]-W0[i])*(i+1e-10)*0.003));
        end;
{Считаем мощность спектра}
WNY:=0;
for i:=0 to 100 do WNY:=WNY+sqr((W[i]-W0[i])*i);

r:=WNX+WNY;
WNX:=WNX/r; WNY:=WNY/r;

{Теперь по диагонали}
{Готовим функцию для Фурье-спектра вдоль x}
for i:=-dxO to dxO do
    f[i]:=MB[xO+i,yO+i];
Mid:=0; for i:=-dxO to dxO do Mid:=Mid+f[i]; Mid:=Mid/(2*dxO+1);
{Считаем нулевой Фурье-спектр}

```

```

for i:=-100 to 100 do
  begin
    WC[i]:=0; WS[i]:=0;
    for j:=-dx0 to dx0 do
      begin
        WC[i]:=WC[i]+{f[j]}Mid*cos(i*j*0.02);
        WS[i]:=WS[i]+{f[j]}Mid*sin(i*j*0.02);
      end;
    W0[i]:=sqrt(sqr(WC[i])+sqr(WS[i]));
  end;
{Считаем Фурье-спектр}
for i:=-100 to 100 do
  begin
    WC[i]:=0; WS[i]:=0;
    for j:=-dx0 to dx0 do
      begin
        WC[i]:=WC[i]+f[j]*cos(i*j*0.02);
        WS[i]:=WS[i]+f[j]*sin(i*j*0.02);
      end;
    W[i]:=sqrt(sqr(WC[i])+sqr(WS[i]));
  end;
{Считаем мощность спектра}
Wd1:=0;
for i:=0 to 100 do Wd1:=Wd1+sqr((W[i]-W0[i])*i);

{Теперь по другой диагонали}
{Готовим функцию для Фурье-спектра вдоль x}
for i:=-dx0 to dx0 do
  f[i]:=MB[x0+i,y0-i];
Mid:=0; for i:=-dx0 to dx0 do Mid:=Mid+f[i]; Mid:=Mid/(2*dx0+1);
{Считаем нулевой Фурье-спектр}
for i:=-100 to 100 do
  begin
    WC[i]:=0; WS[i]:=0;
    for j:=-dx0 to dx0 do
      begin
        WC[i]:=WC[i]+{f[j]}Mid*cos(i*j*0.02);
        WS[i]:=WS[i]+{f[j]}Mid*sin(i*j*0.02);
      end;
    W0[i]:=sqrt(sqr(WC[i])+sqr(WS[i]));
  end;
{Считаем Фурье-спектр}
for i:=-100 to 100 do
  begin
    WC[i]:=0; WS[i]:=0;
    for j:=-dx0 to dx0 do
      begin
        WC[i]:=WC[i]+f[j]*cos(i*j*0.02);
        WS[i]:=WS[i]+f[j]*sin(i*j*0.02);
      end;
    W[i]:=sqrt(sqr(WC[i])+sqr(WS[i]));
  end;
{Считаем мощность спектра}

```

```

Wd2:=0;
for i:=0 to 100 do Wd2:=Wd2+sqr((W[i]-W0[i])*i);

r:=Wd1+Wd2;
Wd1:=Wd1/r; Wd2:=Wd2/r;

{Теперь опять по главным направлениям}
{Готовим функцию для Фурье-спектра вдоль x}
for i:=-dx0 to dx0 do
  f[i]:=MB[x0+i,y0];
Mid:=0; for i:=-dx0 to dx0 do Mid:=Mid+f[i]; Mid:=Mid/(2*dx0+1);
{Считаем нулевой Фурье-спектр}
for i:=-100 to 100 do
  begin
    WC[i]:=0; WS[i]:=0;
    for j:=-dx0 to dx0 do
      begin
        WC[i]:=WC[i]+{f[j]}Mid*cos(i*j*0.02);
        WS[i]:=WS[i]+{f[j]}Mid*sin(i*j*0.02);
      end;
    W0[i]:=sqr(sqr(WC[i])+sqr(WS[i]));
  end;
{Считаем Фурье-спектр}
for i:=-100 to 100 do
  begin
    WC[i]:=0; WS[i]:=0;
    for j:=-dx0 to dx0 do
      begin
        WC[i]:=WC[i]+f[j]*cos(i*j*0.02);
        WS[i]:=WS[i]+f[j]*sin(i*j*0.02);
      end;
    W[i]:=sqr(sqr(WC[i])+sqr(WS[i]));
  end;
{Считаем мощность спектра}
Wr1:=0;
for i:=0 to 100 do Wr1:=Wr1+sqr((W[i]-W0[i])*i);

{Теперь по второму главному направлению}
{Готовим функцию для Фурье-спектра вдоль x}
for i:=-dx0 to dx0 do
  f[i]:=MB[x0,y0+i];
Mid:=0; for i:=-dx0 to dx0 do Mid:=Mid+f[i]; Mid:=Mid/(2*dx0+1);
{Считаем нулевой Фурье-спектр}
for i:=-100 to 100 do
  begin
    WC[i]:=0; WS[i]:=0;
    for j:=-dx0 to dx0 do
      begin
        WC[i]:=WC[i]+{f[j]}Mid*cos(i*j*0.02);
        WS[i]:=WS[i]+{f[j]}Mid*sin(i*j*0.02);
      end;
    W0[i]:=sqr(sqr(WC[i])+sqr(WS[i]));
  end;

```

```

{Считаем Фурье-спектр}
for i:=-100 to 100 do
  begin
    WC[i]:=0; WS[i]:=0;
    for j:=-dx0 to dx0 do
      begin
        WC[i]:=WC[i]+f[j]*cos(i*j*0.02);
        WS[i]:=WS[i]+f[j]*sin(i*j*0.02);
      end;
    W[i]:=sqrt(sqr(WC[i])+sqr(WS[i]));
  end;
{Считаем мощность спектра}
Wr2:=0;
for i:=0 to 100 do Wr2:=Wr2+sqr((W[i]-W0[i])*i);

r:=Wr1+Wr2;
Wr1:=Wr1/r; Wr2:=Wr2/r;
{ r:=Wr1+Wr2+Wd1+Wd2;
Wr1:=Wr1/r; Wr2:=Wr2/r; Wd1:=Wd1/r; Wd2:=Wd2/r;}

{Считаем угол}
alf:=pi/2-arctan(WNY/WNX);//+0.2*WNX/100*90;
if Wd1>Wd2 then alf:=-alf;
alf:=(WNX*pi/2+WNY*0+Wd1*(3*pi/4)+Wd2*pi/4)/2;
alf:=(Wr1*pi/2+Wr2*pi+Wd1*(3*pi/4)+Wd2*pi/4)/2;
alf:=(Wr1*90+Wr2*180+Wd1*135+Wd2*45)/1/180*pi;

if Wd1>Wd2 then alf:=(WNX*90+WNY*180)/1/180*pi;
if Wd1<Wd2 then alf:=(WNX*90+WNY*0)/1/180*pi;

if Wd1>Wd2 then alf:=(Wr1*90+Wr2*180)/1/180*pi;
if Wd1<Wd2 then alf:=(Wr1*90+Wr2*0)/1/180*pi;

// if Wr1>Wr2 then bet:=(Wd1*135+Wd2*45)/1/180*pi;
// if Wr1<Wr2 then bet:=(Wd1*135+Wd2*225)/1/180*pi;

// alf:=(alf+bet)/2;

{Считаем угол траектории}
bet:=-bet+pi/2;

{Считаем скорость подачи}
vpod:=(900+1300)/2+(900-1300)/2*cos(2*(alf-bet));

{TextOut(xC-12,yC-20+13+20,FloatToStr(round(WNX*100)));
TextOut(xC-12,yC-20+26+20,FloatToStr(round(WNY*100)));
TextOut(xC-12,yC-20+39+20,FloatToStr(round(Wd1*100)));
TextOut(xC-12,yC-20+52+20,FloatToStr(round(Wd2*100)));}

{Рисуем угол}
Pen.Color:=ClBlack;
Ellipse(xc-15,yc-15,xc+15,yc+15);

```

```

Pen.Color:=ClRed;
MoveTo(xc+round(15*cos(bet)),yc+round(15*sin(bet)));
LineTo(xc-round(15*cos(bet)),yc-round(15*sin(bet)));

Pen.Color:=ClBlack;
MoveTo(xc+round(15*cos(alf)),yc+round(15*sin(alf)));
LineTo(xc-round(15*cos(alf)),yc-round(15*sin(alf)));

TextOut(xt-10,yt-10,IntToStr(round(vpod)));

{Рисуем траекторию}
{Pen.Color:=ClBlack;
Pen.Width:=round(vpod/50);
MoveTo(xo+round(32*cos(bet)),yo+round(32*sin(bet)));
LineTo(xo-round(32*cos(bet)),yo-round(32*sin(bet)));
Pen.Width:=1;}

end;

Pen.Color:=ClSilver;
Rectangle(650,0,651,800);

Form1.PaintBox1.Canvas.Draw(0,0,BMP);
end;

end;

{ОСНОВНОЙ ЦИКЛ}
PROCEDURE TForm1.Timer1Timer(Sender: TObject); begin
if start=true then
BEGIN
o:=o+1;
t:=t+dt;

{Рисование картинки}
if o = 1 then
Draw;

END;
end;

procedure TForm1.PaintBox1Click(Sender: TObject);
begin
{Draw;}
end;

end.

```